VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

КЛАССИКИ НАУКИ



ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД

ИЗБРАННЫЕ НАУЧНЫЕ ТРУДЫ

РАДИОАКТИВНОСТЬ

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
академик Г. Н. ФЛЕРОВ

СОСТАВИТЕЛЬ И РЕДАКТОР ПЕРЕВОДА
канд. физ.-матем. наук Ю. М. ЦИПЕНЮК



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1971

УДК 539.16

СЕРИЯ «КЛАССИКИ НАУКИ»

Серия основана академиком *С. И. Вавиловым*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

академик *И. Г. Петровский* (председатель),
академик *А. А. Имшенецкий*, академик *Б. А. Казанский*,
академик *Б. М. Кедров*, член-корреспондент АН СССР *Б. Н. Делоне*,
профессор *Ф. А. Петровский*, профессор *Л. С. Полак*,
профессор *Н. А. Фигуровский*, профессор *И. И. Шафрановский*

Избранные научные труды. Радиоактивность. Резерфорд Э. М. «Наука», 1971.

Книга представляет собой избранные труды выдающегося физика XX века Эрнеста Резерфорда, посвященные в основном радиоактивности.

В 1972 году издательство предполагает выпустить книгу, в которую войдут работы Э. Резерфорда по строению атома и искусственному превращению элементов.

Издание приурочено к 100-летию со дня рождения Э. Резерфорда и 75-летию со дня открытия радиоактивности.

На русском языке вошедшие в настоящее издание работы публикуются впервые.

Книга рассчитана на читателей, интересующихся путями развития науки и историей физики.

2-3-7
1-Б 3-15-71

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эрнест Резерфорд пришел в физику в начале XX в., на заре ее второго рождения, и почти сорок лет был одним из тех центров притяжения, к которому стекались ученые со всего мира и где было воспитано несколько поколений физиков — не только экспериментаторов, но и теоретиков.

Настоящее издание — первое собрание научных трудов Э. Резерфорда на русском языке — это дань тем чувствам восхищения и благодарности, которое испытывает человечество перед выдающимся ученым, одним из создателей физики XX в.

Современный читатель, естественно, не станет изучать основы радиоактивности или теории ядра по статьям Резерфорда. Сейчас это не нужно. То, чему когда-то физики посвящали многие годы, постепенно приближаясь к пониманию происходящих в природе процессов, сейчас просто и доступно излагается в соответствующих учебниках. Современному молодому человеку уже с детства «очевидны» такие понятия, как атомарная структура вещества и ядерная структура атома, радиоактивность и возможность искусственного превращения элементов. Необычайная ценность работ Резерфорда для последующих поколений заключена в возможности постичь тот, присущий лишь ему подход к исследованию физических процессов, который приводил великого ученого к фундаментальным открытиям. По его работам можно проследить всю динамику научного познания — от кропотливой и повседневной работы экспериментатора до необычайно удивительных по простоте и физической интуиции выводов. Работы Резерфорда учат искусству исследователя: четкости постановки опытов, умению увидеть в массе цифр с их неизбежными ошибками необычайную красоту физических законов — и в этом их непреходящее значение.

Статьи Резерфорда — своеобразный исторический обзор физики XXв., написанный одним из ее создателей, они позволяют взглянуть «изнутри» на период фундаментальных открытий в развитии физики. Резерфорд практически заложил основы всех современных методов ядерной физики и прежде всего — основы радиоактивных превращений, метод рассеяния частиц, счетчики.

Кроме чисто научных статей, в избранные труды включено несколько лекций Резерфорда обзорного характера — блестящий образец ораторского искусства и истинной популяризации науки. Эти лекции и сейчас

читаются с неослабным вниманием и могут служить прекрасным введением в современную физику. В сборник включено также одно официальное выступление Резерфорда в 1929 г., когда он занимал пост Президента Королевского общества.

Издание тематически разделено на две книги. В первую вошли работы по радиоактивности, во вторую — по строению атома и искусственному расщеплению элементов. В конце первой книги в качестве приложения помещена статья академика Г. Н. Флерова «Развитие учения о радиоактивности в Советском Союзе», а в конце второй — «Воспоминания о Резерфорде», написанные одним из учеников Резерфорда академиком П. Л. Капицей.

Для перевода статей в основном было использовано английское издание трудов Резерфорда «The Collected Papers of Lord Rutherford, London, 1962—1964». Некоторые работы (в основном лекции), которые, по-видимому, должны войти в IV том, еще не изданный в Англии, переводились непосредственно по тексту научных журналов, в которых они были впервые напечатаны. Статьи в сборнике помещены в хронологическом порядке, за исключением некоторой перестановки, связанной с тематическим разделением издания на две книги. В конце второй книги приводится полная библиография работ Э. Резерфорда, составленная канд. филол. наук Ю. Х. Копелевич. Кроме того, во избежание возможных разночтений приводится список встречающихся в тексте фамилий ученых на русском и английском языках.

Перевод был осуществлен группой сотрудников Института физических проблем АН СССР Г. Д. Богомоловым, А. Б. Вагановым, Л. Б. Луганским, В. Н. Самосюком и Ю. М. Ципенюком. Язык перевода, а также использованная терминология неизбежно оказались более современными, нежели оригинал, хотя мы старались по возможности сохранить стиль автора. При работе были использованы переводы некоторых статей Резерфорда, опубликованные на русском языке еще в 20-х годах. Известную трудность представлял собой отбор статей для настоящего издания. Большую помощь в этом деле оказал П. Л. Капица, которому мы приносим искреннюю благодарность.

Сборник избранных работ Э. Резерфорда, мы надеемся, представит большой интерес для широкого круга читателей — не только физиков, но и всех, кто интересуется развитием науки.

Г. Н. Флеров, Ю. М. Ципенюк

1894

1

НАМАГНИЧИВАНИЕ ЖЕЛЕЗА ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ РАЗРЯДАМИ *

I. Намагничивание железа разрядами лейценской банки

Вопрос о намагничивании железа в быстро меняющихся полях рассматривали более или менее полно многие ученые, особенно Лодж, Дж. Дж. Томсон, Герц и др. В книге Лоджа «Современные представления об электричестве» [1] находим следующее: «Но в случае разряда лейденской банки у железа нет преимуществ. Ток колеблется так быстро, что любое железо, введенное в контур, даже если оно сделано в виде тонких проволочек, защищено от магнетизма обратными токами, наведенными в его внешнем слое, и поэтому не намагничивается, а вследствие возрастания индуктивности разрядного контура оно, несомненно, уменьшает его обратным действием этих наведенных токов; фактически оно действует почти так же, как того можно было бы ожидать от меди».

В книге Флеминга «Трансформатор переменного тока» [2, стр. 398] приведено описание экспериментов Лоджа по поведению железа в быстро меняющихся полях: «Что касается кажущегося превосходства железа, то естественно было бы предположить, что, поскольку магнитная проницаемость железа придает ему бóльшую индуктивность, в случае разряда с резким изменением электрической энергии оно окажется менее подходящим проводником. Благодаря тому, что ток проникает только в наружный слой проводника, намагничивается лишь небольшая масса железа, даже если эти мгновенные разряды способны намагнитить железо... электродвижущие импульсы, или внезапные броски электричества, не намагничивают железа, а следовательно, оно не обладает большей собственной индуктивностью, нежели немагнитные проводники тех же размеров».

Герц в своих экспериментах с колебательным контуром пришел к выводу, что железо немагнитно при очень больших частотах. В кратком изложении исследований Герца Флеминг говорит (т. 1, стр. 416): «Герц предположил, что поскольку собственная индуктивность железных проволок для медленных колебаний в восемь — десять раз больше, чем медной проволоки, то, следовательно, короткая железная проволока была бы эквивалентна длинной медной, но оказалось, что это не так, и тогда он решил, что из-за большой частоты колебаний магнетизм железа неспосо-

---

* Transactions of the New Zealand Institute, 1894, **27**, 481—513. Доложено в Институте философии в Кентербери 7 ноября 1894 г.

бен следовать за ними и, следовательно, не влияет на индуктивность». И снова (стр. 423): «Когда проволока была окружена железной трубой или когда она заменялась железной проволокой, ощутимого результата не достигалось, что подтверждает ранее высказанное заключение, по которому магнетизм железа неспособен следовать за столь быстрыми колебаниями и поэтому не оказывает заметного влияния».

Однако Стефан показал, что можно ожидать очень малого изменения индуктивности проволоки, даже если она магнитная, за счет большей концентрации тока в магнитном проводнике на поверхности проволоки.

Дж. Дж. Томсон показал [3], что железный цилиндр, помещенный в соленоид, поглощает за счет более высокой проницаемости железа значительно больше энергии, чем подобный немагнитный проводник равной проводимости.

Дж. Траубридж [4] показал, что сопротивление железных проволок приводит к значительному затуханию электрической энергии, и пришел к выводу, что железо должно иметь весьма высокую проницаемость для объяснения наблюдаемых эффектов.

Наконец, на последней странице книги Грея «Абсолютные измерения» [5] утверждается, что колебания сильнее затухают в резонаторе, если применяется железная проволока, а не медная.

Чтобы исследовать эффект «магнитного проникновения» в железо для полей, меняющихся гораздо быстрее, чем можно было бы получить при использовании «временнóй аппаратуры», наиболее подходящим и легко доступным средством получения очень быстро переменного тока явился разряд обычной лейденской банки.

Вопрос о намагничивании железа в таких полях со времен экспериментов Герца по влиянию разрядов лейденской банки на намагничивание стальных игл мало дискутировался.

В экспериментах, описываемых в данной статье, будет показано, что железо обладает сильными магнитными свойствами в быстро переменных полях, даже когда частота превышает 100 млн. колебаний в секунду.

На маленькую стеклянную трубку был намотан соленоид, состоящий из 60 витков проволоки, с плотностью намотки семь витков на сантиметр. Лейденская банка, заряженная до подходящего потенциала машиной Фосса, разряжалась через соленоид, и любое железо, помещенное внутрь соленоида, независимо от того, представляет ли оно сплошной кусок или набор игл, всегда оказывалось более или менее намагниченным разрядом.

На рис. 1 C — обычная лейденская банка, A — соленоид, S — разрядный промежуток.

Весь разряд проходил через соленоид A. После прохождения разряда иголки исследовались с помощью небольшого зеркального магнитометра. Этот магнитометр применяется во всех последующих экспериментах для проверки намагниченности иголок, поэтому кратко опишем его устройство. Он был сделан по образцу, описанному в книге Грея «Абсолютные измерения» [5, т. 2, стр. 79]. Иголка была небольшой и помещалась

в полость так, что почти полностью там скрывалась. Для увеличения отклонения использовались лампа и шкала. Значение горизонтальной компоненты магнитного поля Земли на игле составляло 0,22 и оставалось практически постоянным, так как поблизости не было железа.

Вначале было установлено, что разрядный ток машины Фосса не действует на иглу, помещенную в соленоид. Машину Фосса раскручивали так, чтобы заряжать банки немного ниже потенциала, необходимого для пробоя между головками S. Затем игла удалялась и проверялась магнитометром. Никакого эффекта не наблюдалось.

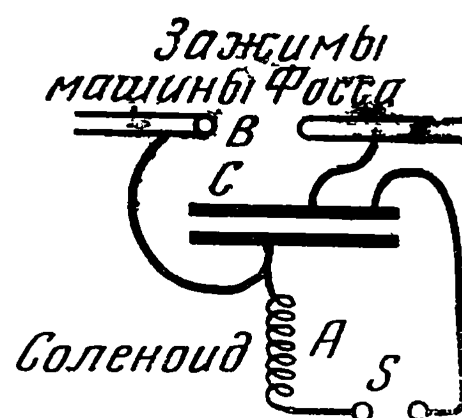


Рис. 1

Сначала исследовалось влияние разряда на иглы разного диаметра; длина игл равна 7 *см*:

1) часть стальной вязальной спицы диаметром 0,103 *дюйм*; отклонение 112, расстояние от иглы магнитометра 9 *см*;

2) стальная фортепианная струна, диаметр 0,032 *дюйм*; отклонение 40, расстояние от магнитометра 9 *см*;

3) тонкая стальная проволока, диаметр 0,008 *дюйм*; отклонение 10, расстояние от магнитометра 9 *см*:

Диаметр, *дюйм*	Отклонение
0,103	112
0,032	40
0,008	10

Из этих экспериментов видно, что отклонение почти пропорционально диаметру проволоки. Этого следует ожидать, так как намагничивающие силы ограничены тонким поверхностным слоем вещества. Величина намагниченности проволоки пропорциональна поверхности железа, а не площади его поперечного сечения, как при намагничивании постоянным током. Чтобы показать, что эффект является поверхностным и совсем не проникает в глубину, иголка помещалась в цилиндр из тонкой меди. Игла не давала заметного отклонения, показывая, что медный цилиндр полностью заэкранировал любое влияние на железо. Тонкий внешний железный цилиндр приводил к такому же эффекту.

Чтобы точно определить состояние иглы после разряда, использовался метод растворения железа. После нескольких предварительных опытов было найдено, что наиболее надежные результаты дает разбавленная HNO_3 при температуре кипящей воды. Чтобы проверить скорость, с которой стравливается железо, был взят кусок фортепианной струны длиной 6,5 *см* и диаметром 0,032 *дюйм* и помещен в соленоид, где был подвергнут действию постоянного поля в 100 *эл.-стат. ед.* В дальнейшем предполагалось, что при этом игла намагнитилась однородно по сечению.

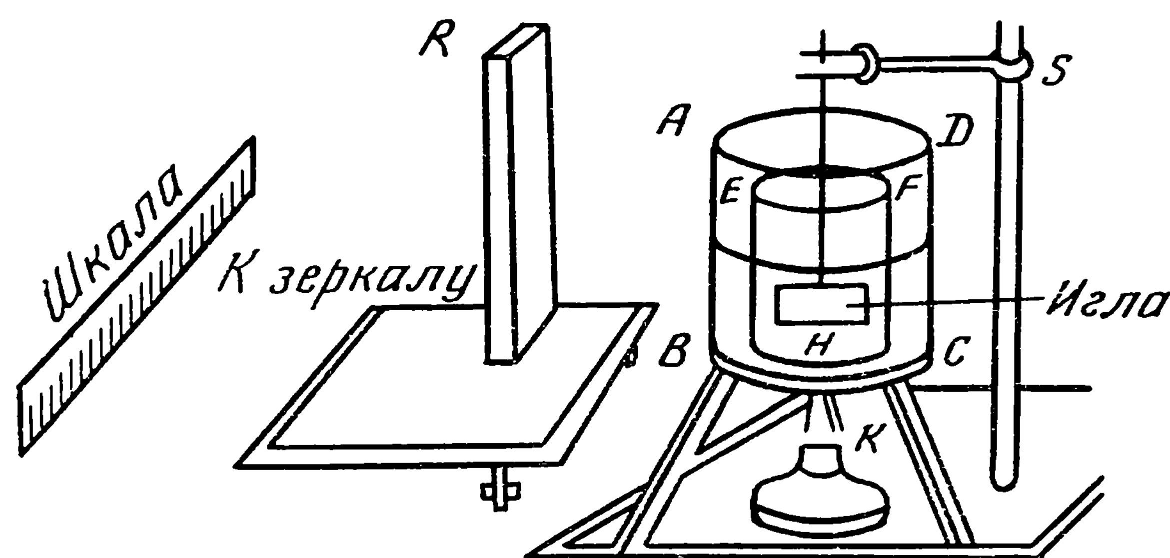


Рис. 2

На рис. 2 *EHF* — стеклянный сосуд внутри другого стеклянного сосуда *ABCD*, который установлен на медном треножнике. Горелка *K* поддерживает кипение воды во внешнем сосуде. Во внутреннем сосуде, не касаясь его, расположена игла, жестко закрепленная концами в легкой рамке. Эта рамка подвешена на отдельной стойке *S*.

Игла закреплена горизонтально на таком расстоянии *R* от магнитометра, чтобы она давала заметные отклонения на шкале. По мере того, как вода нагревается до точки кипения, отклонение, вызываемое иглой, немного уменьшается из-за влияния температуры на магнитный момент иглы.

Рядом на подставке в мензурке с кипящей водой находится разбавленная HNO_3, и, когда все готово, HNO_3 быстро переливают в сосуд *EHF* так, чтобы не потревожить иглы. В момент, когда HNO_3 достигает в сосуде уровня иглы, отмечается время, так как с этого мгновения игла начинает растворяться. Наливается столько HNO_3, чтобы покрыть иглу на полдюйма.

По мере того, как игла растворяется, отклонение уменьшается, и его значение отмечалось в разные моменты времени. Этот способ — сначала закрепление иглы, а потом вливание кислоты — был неизбежен, так как иначе нельзя получить максимального отклонения, вызванного иглой. Поддерживая HNO_3 при 100°C и быстро перенося ее в сосуд (в свою очередь окруженный кипящей водой), мы обеспечиваем такие условия, чтобы игла покрывалась HNO_3 одной и той же температуры в течение всего времени растворения. Так как количество кислоты велико по сравнению с

иглой, влияние растворения железа не изменяет заметно скорости растворения иглы.

Оказалось, что однородно намагниченная стальная игла растворяется очень равномерно, пока не уменьшится до чрезвычайно тонкой нити, которая разламывается, когда отклонение магнитометра упадет до трех делений. Ниже приведены результаты эксперимента с однородно намагниченной иглой (диаметр иглы 0,032 *дюйм*, постоянное отклонение перед тем, как вливается кислота, равно 222):

Время после начала растворения, *сек*	0	30	49	56	90	115	139	206
Отклонение	222	217	195	177	157	147	137	107

Время после начала растворения, *сек*	246	311	373	414	454	566	638
Отклонение	97	77	57	47	37	17	7

Следовало бы ожидать, что скорость растворения металла в каждый момент пропорциональна поверхности металла в этот момент, т. е. радиусу проволоки. Это очень точно соблюдается в описанном выше эксперименте. Отклонение магнитометра в каждый момент пропорционально поперечной площади проволоки, т. е. квадрату радиуса. Следовательно, радиус проволоки в любой момент известен.

Если нарисовать кривую, по абсциссе которой отложить время, а по ординате — радиус проволоки в различные моменты, то оказывается, что она представляет собой почти прямую линию, за исключением нерегулярностей в начале кривой.

Затем была взята стальная игла диаметром 0,032 *дюйм* и намагничена пропусканием через соленоид разряда от четырех лейденских банок, соединенных в параллель. Разрядный промежуток составлял 0,1 *дюйм*. Была сделана поправка на уменьшение отклонения при помещении иглы в разбавленную HNO_3 при 100°С (рис. 3).

Ниже приведены значения отклонения в разные моменты времени. Для удобства вычерчивания кривых значения времени и отклонения нормированы:

Абсцисса	0,0	0,7	1,7	3,2	4,2	5,2	6,2	7	8
Ордината	8,5	12,5	14	15	15,3	15,6	15,5	15	14

Абсцисса	9,2	10,5	11,7	12,9	14,4	16,2	18,2	20,2
Ордината	12	10	8	6	4	2	1	0,5

Сначала устойчивое отклонение равнялось 85. Как только железо начало стравливаться, отклонение стало быстро расти и достигло максимума 156. Короткое время оно оставалось постоянным на максимальном значении, а затем быстро упало до нуля. Когда отклонение упало до нуля,

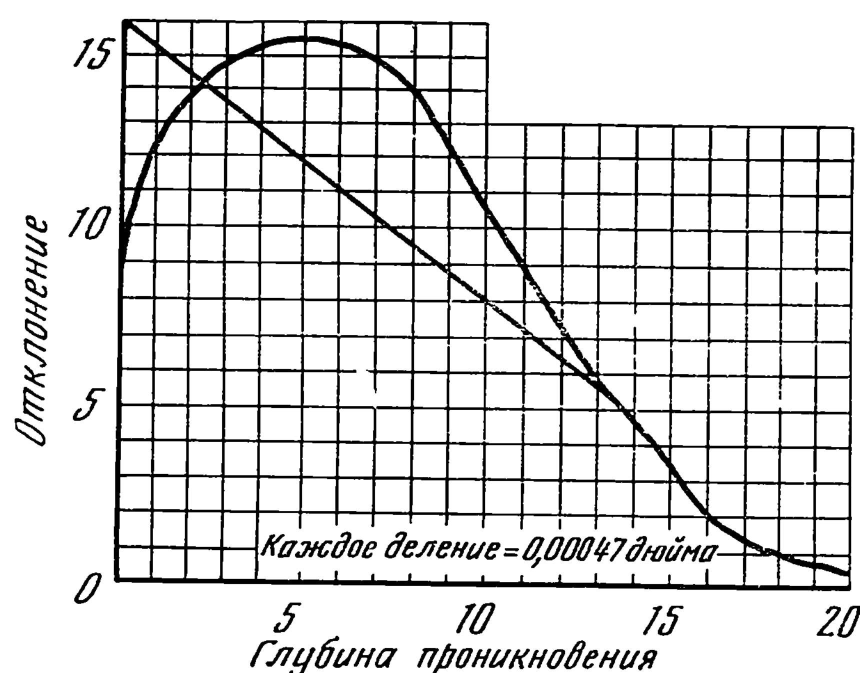


Рис. 3

игла была удалена из сосуда, ее диаметр был измерен, и оказалось, что он равен 0,013 *дюйм*. Следовательно, глубина магнитного проникновения составила 0,0095 *дюйм*.

Из результатов опытов по травлению однородно намагниченных иголок видим, что глубина, до которой растворяется железо, пропорциональна времени. За 200 *сек* растворения толщина составила 0,0095 *дюйм*, скорость растворения равна 0,000047 *дюйм/сек*.

Если через I обозначить интенсивность намагничивания тонкого кругового слоя на расстоянии r от центра иглы, а через M — отклонение магнитометра в некоторый момент времени, то

$$\int I 2\pi r\, dr \sim M$$

и

$$Ir \sim \frac{dM}{dr}.$$

Если a — первоначальный радиус иглы, то, как показано, $(a-r)$ пропорционально t (времени действия кислоты).

Пусть

$$a - r = Kt,$$

тогда

$$-dr = K\,dt,$$

и, подставляя в уравнение, получаем $I(a - Kt) \sim dM/dt$, так как $dr \sim dt$, откуда

$$I \sim \frac{1}{a - Kt} \frac{dM}{dt}.$$

Итак, dM/dt представляет собой значение тангенса угла, который образует касательная в любой точке верхней кривой (см. рис. 3) с осью абсцисс. Следовательно, величина dM/dt известна из этой кривой. Поэтому мы можем определить кривую изменения I от поверхности к центру, хотя нет достаточно данных, чтобы вычислить абсолютное значение I.

Кривая на рис. 4 примерно отражает изменение намагниченности от поверхности внутрь. Ординаты соответствуют I — интенсивности намагничивания, а абсциссы — расстоянию от внешней поверхности проволоки.

Получается, что поверхностный слой намагничивается в противоположном направлении по отношению к основной части намагниченного металла.

По мере того, как мы идем внутрь от поверхности, интенсивность намагничивания быстро спадает, пока в точке A мы не достигнем той части металла, которая не намагничена. Назовем ее «нейтральной точкой».

При проникновении еще дальше намагниченность меняет знак и быстро возрастает до максимума, который, вероятнее всего, соответствует насыщению стали. Затем интенсивность остается практически постоянной, пока в точке D она не начинает быстро падать к нулю.

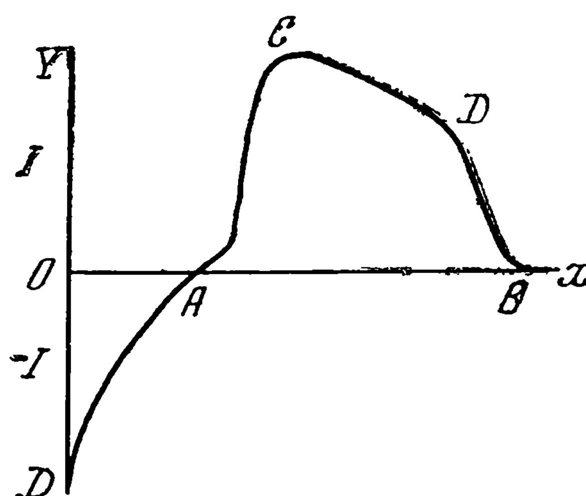


Рис. 4

Из характера изменения намагниченности внутри металла очевидно, что железо подверглось влиянию колебательного разряда. Первый полупериод проник на глубину 0,001 *дюйм*, который на рисунке соответствует расстоянию OB. Нейтральная точка A находится на расстоянии 0,00025 *дюйм* от поверхности. Второй полупериод, очевидно, существенно уменьшился по амплитуде, так как его глубина проникновения составляет только около четверти глубины проникновения первого разряда.

В этом опыте получено доказательство существования только двух полупериодов. Исследовалось несколько иголок, которые намагничивались под влиянием разных полей и при разных длинах разрядного промежутка, но существование второго колебания нельзя было с уверенностью обнаружить.

Все использованные иголки давали один и тот же общий результат, т. е. тонкий поверхностный слой, намагниченный в одном направлении, и более толстый внутренний слой, намагниченный в противоположном направлении.

В одном из исследованных случаев глубина проникновения первого разряда была значительно меньше 0,001 *дюйм*. Исследовалось также влияние изменения емкости конденсатора при постоянных индуктивности и искровом промежутке.

В первом опыте четыре лейденских банки соединялись параллельно, и глубина проникновения при этом, как оказалось, равна 0,01 *дюйм*. В следующем опыте две лейденских банки были размещены последовательно и было найдено, что глубина проникновения равна 0,0035 *дюйм*.

Следовательно, в первом случае разряд проник на расстояние в 2,8 раза больше, чем во втором. Но емкость в первом случае была в 8 раз больше, чем во втором; так как $\sqrt{8} = 2{,}8$, то, следовательно, из этого эксперимента видим, что глубина проникновения пропорциональна квадратному корню из емкости.

Из уравнения разряда лейденской банки емкостью C через индуктивность L следует, что максимальный ток выражается так:

$$j = \frac{CV_0}{(LC)^{1/2}} e^{-\frac{R}{2L}t},$$

где V_0 — потенциал заряда; R — сопротивление контура.

Следовательно, ток меняется как $\sqrt{C}$. Поэтому глубина проникновения пропорциональна максимальному току.

II. Влияние последующих разрядов на магнетизм иглы

Наблюдения показали, что намагниченность иглы увеличивается при пропускании большого числа импульсов в одном направлении. Во всех экспериментах, описанных ниже, использовалась однородно намагниченная игла и наблюдалось влияние разряда на уменьшение отклонения, вызванного иглой. Однородно намагниченная игла обладает многими

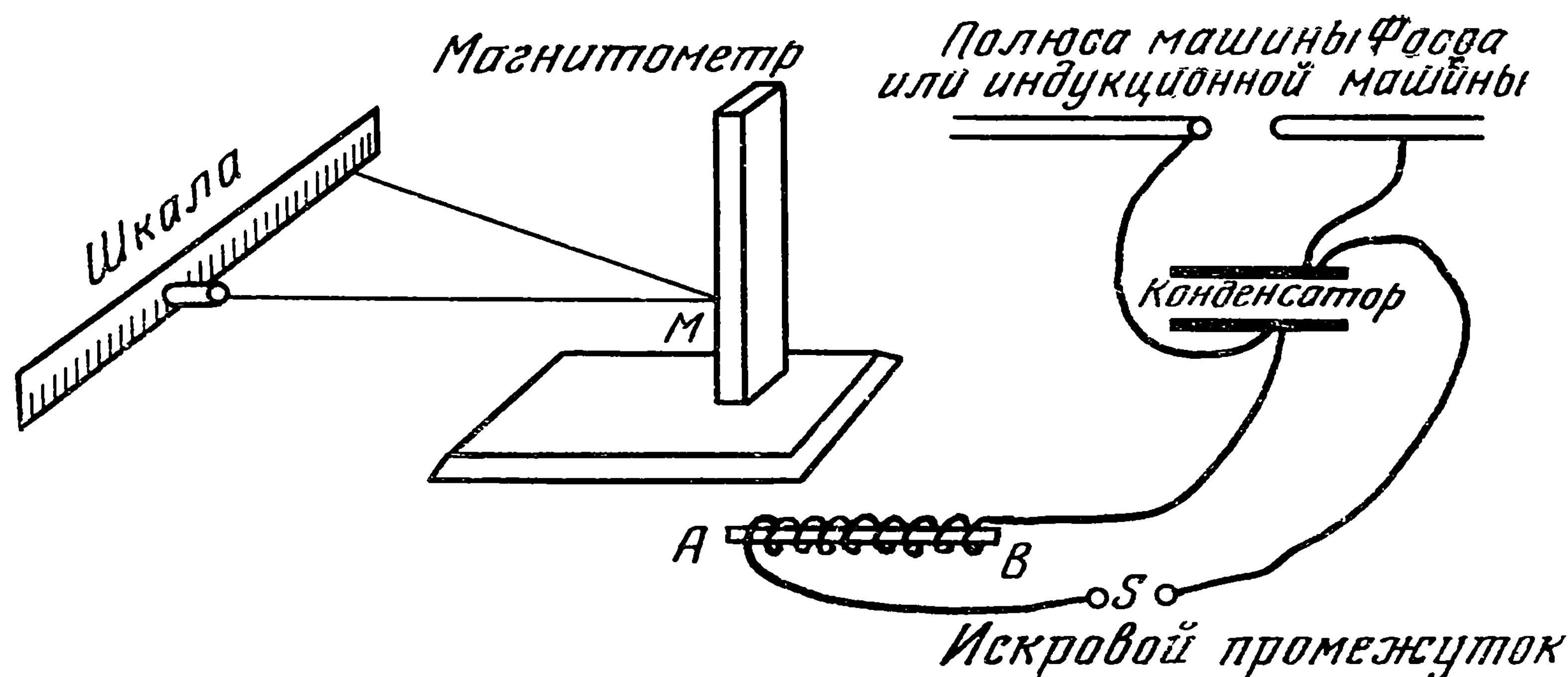


Рис. 5

преимуществами по сравнению с ненамагниченной обычной иглой. Эти преимущества нет необходимости обсуждать здесь, так как они будут достаточно очевидны в дальнейшем.

Был намотан соленоид из большого числа витков, и через него пропускали ток от батареи, достаточный, чтобы создать в соленоиде поле более 100 *эл.-стат. ед.* Таким образом, при необходимости стальную иглу намагничивали практически до насыщения, помещая ее в соленоид с током.

Конденсатор (рис. 5) заряжался машиной Фосса или индукционной

машиной. В большинстве последующих экспериментов использовалась индукционная машина.

Помещенный сзади магнитометра соленоид AB имел плотность намотки примерно три витка на сантиметр. Игла сначала насыщалась, а затем помещалась в соленоид на таком расстоянии от магнитометра, чтобы создаваемое ею отклонение было достаточно заметным. Когда в S происходила искра, отклонение, вызываемое иглой в AB, уменьшалось. Наблюдалось, что влияние колебаний на иглу с первым разрядом не прекращалось, а отклонение постепенно уменьшалось после каждой прошедшей искры, пока, наконец, железо не достигало устойчивого состояния и дальнейших изменений не происходило, хотя после этого пропускали еще много искр.

Существовало также заметное различие эффектов, обусловленных разрядами в противоположных направлениях при одной и той же насыщенной игле.

1. Когда первый полупериод имел тенденцию намагнитить иглу в том же направлении, в котором она уже была намагничена, он не оказывал влияния на иглу, которая уже была насыщена. Второй полупериод имел тенденцию размагнитить иглу, третий намагнитить ее, и т. д.

Как пример влияния последних результатов в этом случае, приведем следующие результаты:

Номер искры	0	1	2	Несколько искр
Устойчивое отклонение	252	226	217	210

2. Когда первый полупериод имел тенденцию размагнитить иглу, влияние нескольких разрядов на уменьшение отклонения оказывается гораздо большим:

Номер искры	0	1	2	3	4	5	6	9	10	20
Устойчивое отклонение	252	156	102	83	67	54	45	25	15	10

Отклонение не падает ниже десяти делений, хотя прошло много искр. Железо достигло устойчивого состояния. Постепенное размагничивание железа следующими один за другим разрядами хорошо иллюстрируется приведенными выше данными. Причина эффекта сначала была неясна, но дальнейшие опыты показали, что он обязан быстрому затуханию колебаний. Первое колебание размагничивает поверхностные слои и, вероятно, намагничивает тонкую поверхностную оболочку до насыщения в противоположном направлении. Второй полупериод стирает часть этого противоположно направленного магнетизма, но на несущественную глубину, так как амплитуда колебаний к этому времени сильно уменьшается. Третий полупериод имеет тенденцию снова намагнитить железо, и т. д.

Когда следующий разряд проходит через соленоид, первый полупериод должен прежде всего размагнитить или намагнитить поверхностные слои

в направлении, противоположном магнетизму иглы. Когда он проникает через тонкий поверхностный слой, магнитная сила наталкивается на слой железа, обладающий низкой проницаемостью, так как большая часть уже намагничена почти до насыщения в том же самом направлении действием первого полупериода первого разряда. Поэтому второй разряд проникает дальше, так как мы знаем, что магнитная сила проникает глубже в такой проводник, как медь ($\mu = 1$), нежели в такой проводник, как железо, где μ может быть значительным. Еще больше железа размагничивается, и отклонение уменьшается. Это продолжается по мере того, как проходит искра за искрой, пока, наконец, разряд не сможет проникать дальше. Это соответствует устойчивому состоянию. С помощью растворения иглы было найдено, что под действием такой последовательности разрядов отклонение устойчиво возрастает, по мере того как игла стравливается, показывая, что поверхностный слой намагничен в направлении, противоположном направлению намагничивания центральной части.

В подробно описанном выше эксперименте было обнаружено, что разряд проникает почти на четверть радиуса, т. е. на расстояние 0,008 *дюйм*. Когда эксперименты проводились с тонкими стальными иголками, они часто полностью размагничивались и намагничивались в противоположном направлении последовательными разрядами (например, тонкая стальная игла, диаметр 0,008 *дюйм*):

1. Влияние второго полупериода и последующих:

Номер искры	0	1	2	3	
Отклонение	150	80	55	50	и т. д.

2. Влияние первого полупериода и последующих:

Номер искры	0	1	2	3
Отклонение	150	—15	—120	—140

Этот эффект наблюдается в мягком железе, как и у стальных иголок.

Разница между действием первого и второго полупериодов на размагничивание железа очень заметна. Опыты отчетливо показывают, как быстро затухают колебания по амплитуде. Если мы пользуемся контуром с емкостью около 1000 *эл.-стат. ед.* и малой индуктивностью, то наиболее вероятно, что происходит только одно полное колебание. Другие затухают до такого уровня, что становятся несущественными. Тот факт, что отклонение, вызванное иглой, всегда уменьшается, независимо от направления первого колебания, ясно показывает, что разряд носит осцилляторный характер. Если бы существовал только однонаправленный разряд, игла подвергалась бы воздействию только при определенном направлении разряда.

Простые эксперименты такого рода с обычными стальными иглами показали, что разряд лейденской банки является переменным и что амплитуда колебаний быстро затухает. Позднее будет дан способ вычисления отношения амплитуд первого и второго полупериодов.

Вопрос о затухании амплитуды колебаний разряда лейденской банки чрезвычайно интересен, особенно в связи с сопротивлением искровых промежутков и излучением энергии в пространство.

Пусть L — индуктивность разрядного контура для быстрых колебаний; C — емкость конденсатора; V_0 — потенциал банки; R — сопротивление соединений и искрового промежутка разряду. Тогда ток j в любой момент времени выражается так:

$$j = \frac{CV_0}{(LC)^{1/2}} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \frac{t}{(LC)^{1/2}}.$$

Экспоненциальный множитель включает только потери энергии на трение, и в нем не учитывается излучение в пространство. В экспериментах, рассматриваемых в данной статье, в которых конденсатором служила лейденская банка, силовые линии которой проходят только от одной обкладки к другой, можно осуществить очень малые потери энергии на излучение [3]. Мы можем получить довольно точную оценку затухания амплитуды колебания из экспериментов по стравливанию иголок с помощью HNO_3, но можно получить и более полезную оценку из рассмотрения потери магнетизма иглой, измеренной с помощью магнитометра.

Два малых противоположно намотанных соленоида A и B (рис. 6) соединялись последовательно, связывая обкладки обычной лейденской банки, разряжающейся через искровой промежуток длиной 0,1 *дюйм*. Две идентичные стальные иглы, намагниченные до насыщения, помещались в соленоиде A и B так, чтобы их северные полюса были направлены в одну сторону.

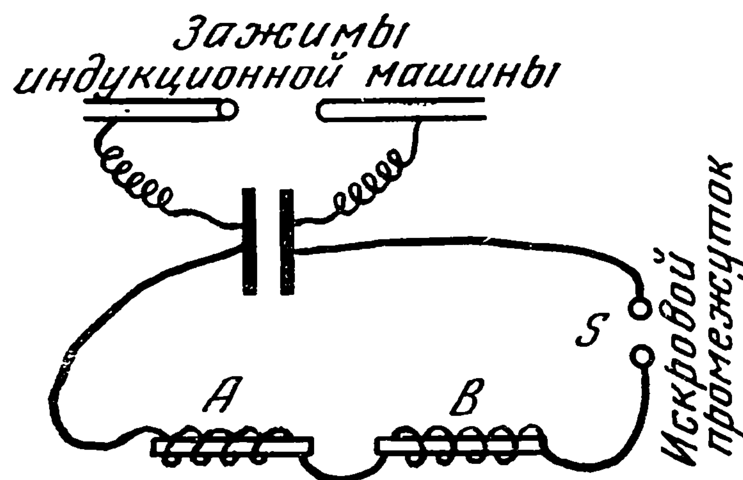


Рис. 6

Когда лейденская банка разряжается через искровой промежуток, первый полупериод имеет тенденцию намагнитить иглу в A до большего значения, но она практически насыщена, поэтому он не оказывает на нее никакого влияния. Второй полупериод имеет тенденцию размагнитить иглу, третий полупериод — намагнитить ее снова, и т. д.

Однако первый полупериод производит в полной мере размагничивание иглы в B, второй полупериод имеет тенденцию намагнитить ее снова, и т. д.

Игла в A: первый, третий, пятый, седьмой и т. д. полупериоды имеют тенденцию намагничивать иглу в первоначальном направлении; второй, четвертый, шестой, восьмой и т. д. стремятся размагнитить иглу.

Игла в B: второй, четвертый, шестой и т. д. имеют тенденцию намагнитить иглу; первый, третий, пятый и т. д. стремятся размагнитить ее.

Далее, сила поля в соленоиде, длина которого велика по сравнению с его радиусом, выражается следующим образом:

$$H = 4\pi nc,$$

где n — число витков на сантиметр.

Предположим теперь, что соленоиды A и B имеют одно и то же число витков на сантиметр. Тогда игла в B, поскольку на нее действует первый полупериод, размагнитится в большей степени, чем игла в A. Уменьшение отклонения в каждом случае легко определяется маленьким зеркальным магнитометром.

Уменьшим число витков на сантиметр соленоида B так, чтобы уменьшение отклонения для каждой иглы было в точности одинаковым после одного разряда. Максимальная намагничивающая сила, действующая на иглу в A, равна $4\pi nc$, где c — максимальный ток второго полупериода, а максимальная намагничивающая сила, действующая на иглу в B, равна $4\pi n'c'$, где n' — число витков на сантиметр, а c' — максимальный ток первого полупериода.

Далее, так как влияние на иглы идентично в обоих случаях и период колебаний один и тот же, то максимальные намагничивающие силы в обоих соленоидах должны быть равны:

$$4\pi nc = 4\pi n'c',$$

откуда

$$\frac{c}{c'} = \frac{n'}{n},$$

или отношение максимальных токов двух полупериодов обратно пропорционально отношению чисел витков на сантиметр соленоидов. Сюда, конечно, входит предположение, что при постоянном периоде влияние на иглы пропорционально максимальной намагничивающей силе. Экспериментально было найдено, что глубина проникновения магнитной силы пропорциональна величине максимального тока при постоянном периоде, так что сделанное предположение очень близко к истине.

Связь между глубинами проникновения при разных периодах колебаний была более сложной и не выражалась простым соотношением.

При проведении экспериментов было обнаружено, что вместо одного разряда полезно пропускать около 20, так как глубина проникновения при этом значительно возрастала и, кроме того, воздействие первого эффективного полупериода в большей степени отличалось от воздействия второго.

Было поставлено много экспериментов при различных условиях по измерению соотношения между амплитудами первого и второго полупериодов. Описание некоторых из них включено в раздел «О сопротивлении искровых промежутков» в конце этой статьи.

Общий полученный результат таков: для искрового промежутка длиной 0,1 *дюйм* и индуктивности контура около 4000 *эл.-стат. ед.*, амплитуда второго полупериода составляла менее половины амплитуды первого полупериода.

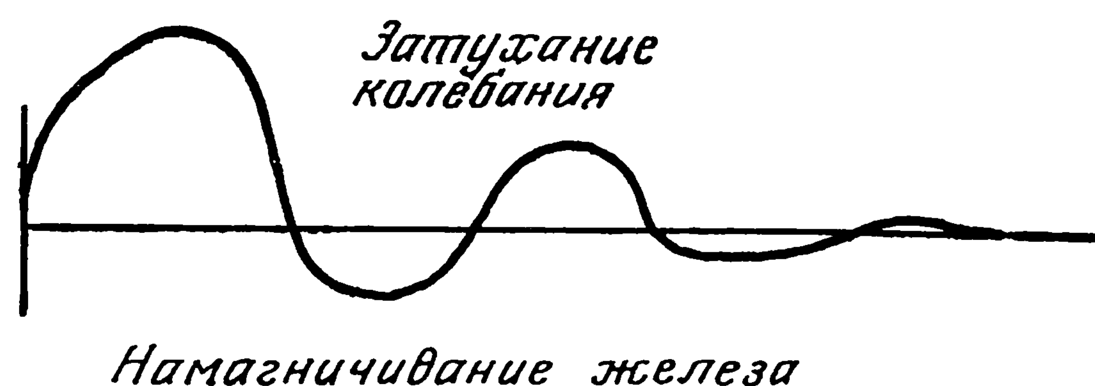


Рис. 7

В качестве примера подобного опыта приведем следующие данные: когда в одном соленоиде 2,15 витков на сантиметр, а в другом 1,06 витков на сантиметр, действие на иглы было в точности одинаковым. Иными словами

$$\frac{\text{Амплитуда второго полупериода}}{\text{Амплитуда первого полупериода}} = \frac{1,06}{2,15} = 0,493,$$

или почти половина.

Если такая скорость затухания сохраняется для последующих колебаний, то амплитуда второго колебания равна только четверти амплитуды первого колебания.

Кривая на рис. 7 лишь качественно показывает затухание колебаний. Если скорость затухания сохраняется для нескольких колебаний, то ток при последующих колебаниях будет составлять только малую часть первоначального максимального значения. Было показано, что намагниченная стальная игла, помещенная в малый соленоид, может быть использована в качестве детектора колебательного разряда, а также как средство определения скорости затухания колебаний.

Был предпринят ряд различных экспериментов, чтобы показать, что железо обладает магнитными свойствами под влиянием любых видов разряда.

1. Игла помещалась в соленоид, связывающий внешние обкладки лейденских банок A и B, расположенных, как в опытах Лоджа, по «переменному пути». На рис. 8 A и B — две лейденские банки, соединенные последовательно через соленоид D. Когда в C проскакивает искра, через соленоид D проходит электрический импульс. У помещенной в соленоид

проволоки из стали или мягкого железа обнаруживаются те же эффекты, как и в том случае, когда разряд происходит обычным путем. Проволока всегда размагничивается, и потеря магнетизма почти точно такая же, как в случае, когда банки соединены и разряжаются обычным способом. Скорость затухания амплитуды тоже такая же, а что касается влияния на намагничивание игл, то импульсный разряд обладает почти той же природой, что и обычный разряд.

2. Затем игла помещалась в малый соленоид последовательно с одним из длинных проводов, протянутым от обкладок конденсатора, как в опыте Лоджа, по измерению скорости электрического излучения.

На рис. 9 *BD*, *EF* — пара проводов от конденсатора, длиной около 20 ярдов каждый. Эта длина была выбрана так, чтобы позволить по возможности лучше настроиться в резонанс с разрядом в *A*, т. е. чтобы длина одного из проводов составляла половину длины волны. При длине искры в *A* 0,1 *дюйм* в искровом промежутке можно было получить искру в $^3/_4$ *дюйм*, а на концах проводов возникал прекрасный тлеющий разряд всякий раз, когда в *A* проскакивала искра.

Величина отклонения иглы после разряда всегда уменьшалась, но между амплитудами первого и второго полупериодов не было такой разницы, как в предыдущих случаях.

При разряде в одном направлении отклонение упало с 310 до 250, при разряде в противоположном направлении — с 300 до 255, что свидетельствует о незначительном отличии первого и второго полупериодов по амплитуде.

Вполне возможно, что когда длинные провода подобраны в резонанс с разрядным током, скорость затухания колебаний в них не зависит от

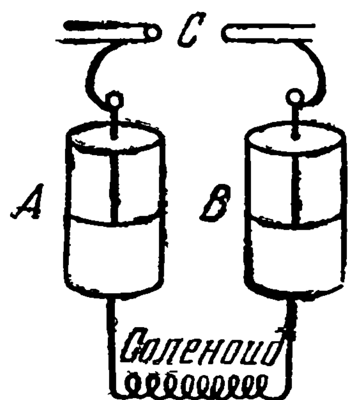


Рис. 8

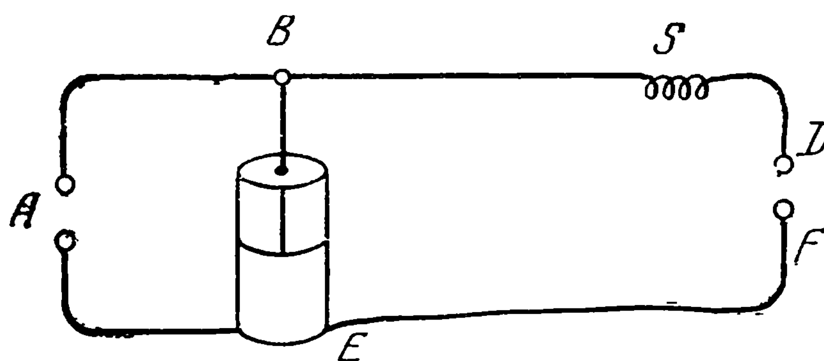


Рис. 9

скорости затухания разрядного контура. Длинные провода действуют как резонатор и осциллируют еще долго после того, как колебания в вибраторе исчезнут. Расстояние между наконечниками проводов мало влияет на воздействие разряда на иглу. Чтобы намагнитить железо в быстрых полях, не требуется наличия замкнутого контура. Позднее будет приведен другой пример данного утверждения.

Из этого и предыдущего экспериментов мы видим, что железо проявляет магнитные свойства под влиянием импульсов электричества.

III. Влияние наведенных вторичных токов на намагничивание железа

Внутри стеклянной трубки (рис. 10) была помещена первичная катушка из десяти витков изолированной проволоки, а снаружи трубки была расположена вторичная катушка из двенадцати витков. Через первичную катушку проходил разряд, а во вторичной возникали наведенные токи, создавая маленькую искру в промежутке *B*. Когда намагниченную стальную проволоку диаметром 0,032 *дюйм* поместили в соленоид с тремя витками на сантиметр, отклонение упало с 300 до 261.

Чтобы обнаружить влияние сопротивления на величину тока во вторичной катушке, последовательно с ней было помещено десять ярдов проволоки из платиноида. Отклонение упало с 300 до 285.

Удалив эту проволоку и поместив вместо нее медную той же длины и поперечного сечения, мы наблюдали очень незначительную разницу в отклонении, хотя сопротивление проволоки из платиноида было 130 *ом*, а сопротивление медной проволоки не превышало 3 *ом*. Это говорит о том, что заряд, текущий по вторичной катушке, практически не зависит от сопротивления проводов. Это согласуется с теорией. Так, если M — коэффициент взаимной индукции между катушками, а L — индуктивность вторичной катушки, то количество электричества, циркулирующее во вторичной цепи, определяется выражением $M/(R^2 + p^2L^2)^{1/2}$ и, когда p велико, величиной R можно пренебречь по сравнению с pL.

Если $L = 3000$, частота 2 000 000, $p \cong 12 \cdot 10^6$, то $pL = 36 \cdot 10^9$. Следовательно, чтобы R^2 могло бы быть сравнимо с p^2L^2, R должно быть равным 10 *ом* или более.

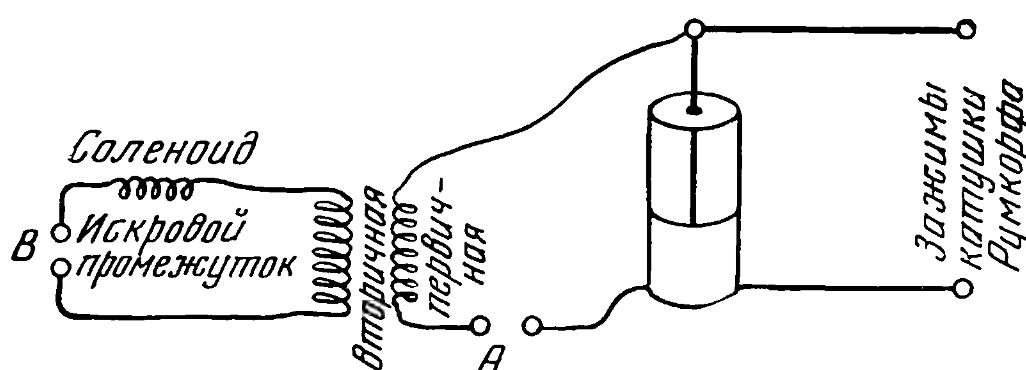


Рис. 10

В рассматриваемых экспериментах короткий угольный стержень сопротивлением в 10 *ом*, включенный в цепь, не изменял действия разряда на иглу, показывая, что pL на самом деле должно быть существенно больше, чем в приведенном выше вычислении. После добавления во вторичную цепь соленоида из 60 витков уменьшение отклонения стало едва заметным; это показывает, что ток, циркулирующий во вторичной цепи, зависит от индуктивности, но не зависит от сопротивления в широких пределах.

IV. Эксперименты с гантельным осциллятором Герца

В рассмотренных ранее опытах обычная короткая фортепианная струна диаметром 0,032 *дюйм* оказалась хорошим детектором. Но, когда мы достигли скорости осцилляций более 100 млн. в секунду, потребовался более чувствительный детектор.

Была взята очень тонкая закаленная стальная проволока и нарезана на куски длиной 1 *см*. Затем 24 таких тонких иголки были соединены вместе, причем предварительно каждая игла опускалась в парафин, чтобы исключить прохождение вихревых токов с одной проволоки на другую. Эта небольшая связка иголок образует составной магнит, обладающий значительной поверхностью, что существенно для действия быстро изменяющихся намагничивающих сил. Для удобства детектор закреплялся в конце тонкой стеклянной трубки.

Вследствие размагничивающего влияния концов этот детектор сохранял лишь около $^1/_3$ своего значения намагниченности. Намагниченный и помещенный в соленоид из двух или трех витков, он представляет собой чрезвычайно чувствительное средство обнаружения и измерения токов высокой частоты. Он оказался слишком чувствительным для использования в опытах с обычными лейденскими банками, так как полностью размагнитился разрядом уже при одном витке проволоки вокруг трубки. Но для частот от 100 млн. и выше, где количество электричества, участвующее в движении, мало, он дал удовлетворительные результаты.

На рис. 11 *B* и *C* — две металлические пластины площадью около 20 *см*^{2}, расположенные так, как в опыте Герца. Последовательно с разрядным контуром в точке *D* помещался маленький соленоид из двух витков (в нем

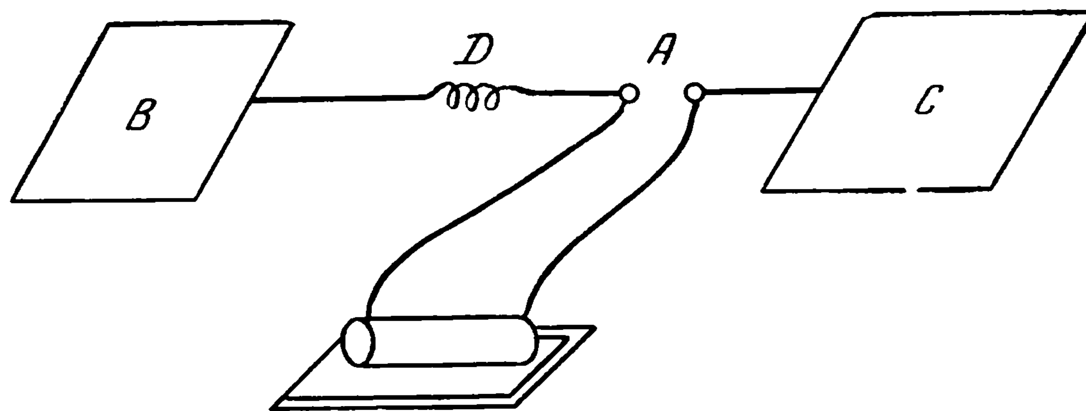


Рис. 11

использовалось не более 2 *см* проволоки). Когда индукционная катушка вызывала разряд в *A*, возникали колебания, частота которых в этом случае превышала 100 млн. колебаний в секунду.

Когда вокруг детектора наматывали два витка, отклонение уменьшалось с 300 до 250 в одном направлении и с 300 до 274 в другом. Это указывало на то, что затухание амплитуды колебаний почти равно затуханию при обычном разряде лейденской банки.

К сожалению, я не очень различал «активную» и «обычную» искру. Герц отмечал, что активной искрой были только те, которые возбуждали

колебания в соседних проводниках, а в данном случае по быстрому затуханию амплитуды почти уверенно можно сказать, что происходила не «активная» искра.

Это подтверждается тем фактом, что независимо от того, получалась ли искра с помощью машины Фосса или с помощью катушки Румкорфа, воздействие на иглу отличалось очень мало, тогда как Герц специально подчеркивает, что колебания в соседних проводниках не возбуждаются, если не используется катушка Румкорфа, и что с помощью машины Фосса их совсем нельзя возбудить.

Затем исследовалось действие токов в резонансном контуре. Этот эксперимент был проведен точно так же, как и опыты Герца. На рис. 12 *C* и *C'* — два проводника малой емкости, прикрепленные к концам проводов, чтобы создать в разрядном контуре необходимую емкость; *abcd* —резонансный контур; *M* — искровой промежуток в резонаторе.

Когда через *B* проходит разряд, в контуре возникают колебания. Детектор размещался в плече *ca* резонатора; когда вокруг детектора было три витка проволоки, отклонение уменьшалось с 300 до 253.

Чтобы разряд влиял на иглу, он совсем не обязательно должен происходить в *M*; действие было все еще значительным, когда наконечники в *M* оказывались на расстоянии 1 *фут* и более один от другого. Если удалена одна сторона прямоугольника, эффект все еще наблюдался, но не столь значительный, как в том случае, когда контур настроен в резонанс с первичным. Следовательно, в быстро переменных полях железо намагничивается в открытом контуре. Чтобы размагнитить железо, вполне

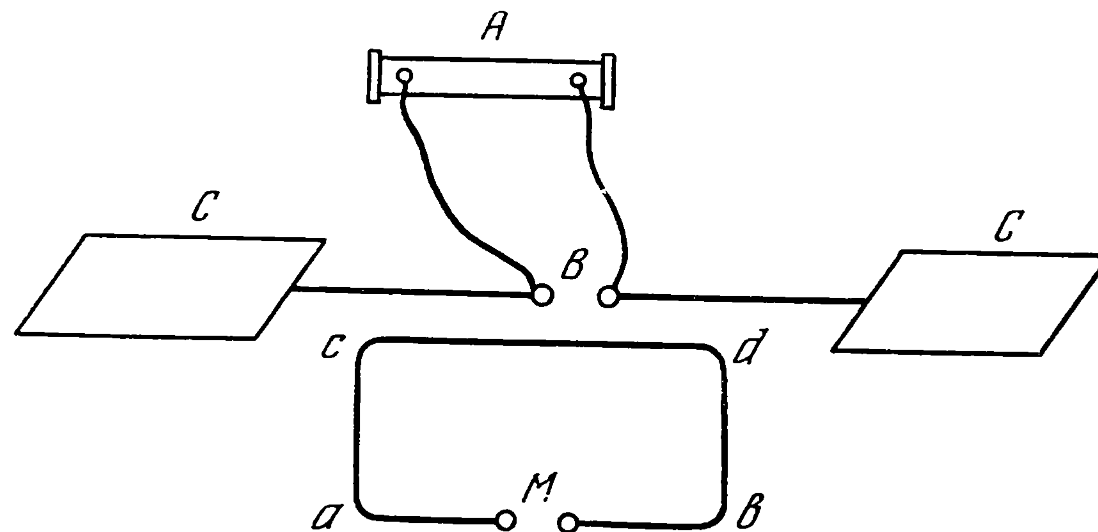


Рис. 12

достаточно быстрых колебаний в проводнике, а полного контура не требуется. Позднее будет рассмотрено использование чувствительного детектора как средство изучения волн вдоль проводов. Было показано, что в полях с частотой более 100 млн. колебаний в секунду железо еще обладает магнитными свойствами. Игла может быть намагничена или размагничена в открытом контуре колебаниями, возникшими в проволоке.

Теперь приступим к более детальным опытам по поглощению энергии железными цилиндрами и опытам по сопротивлению железных проволок в быстро переменных полях.

V. Поглощение энергии проводниками

Этот вопрос был рассмотрен математически и экспериментально Дж. Дж. Томсоном [3]. Наблюдая действие разряда на специально изготовленную вакуумную трубку, он показал, что железный цилиндр поглощает значительно больше энергии, чем медный. Экспериментальный метод, развитый в данной работе, полностью отличается от метода Дж. Дж. Томсона, но полученные окончательные результаты те же самые. Кроме того, они носят количественный характер, в то время как метод Томсона позволял получать лишь качественные результаты.

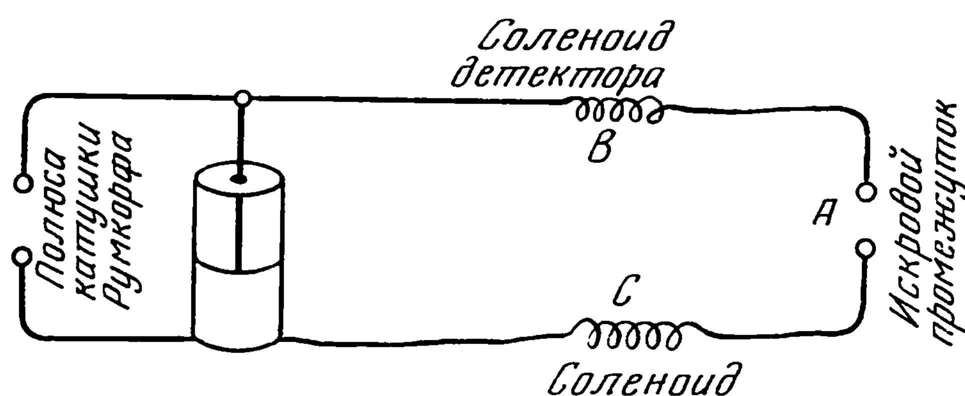


Рис. 13

Обычная лейденская банка разряжалась через искровой промежуток *A* (рис. 13). В разрядном контуре находился соленоид *C*, состоящий примерно из 30 витков, длиной 14 *см* и радиусом около 1 *см*. Маленькая катушка *B* из трех витков использовалась как соленоид детектора.

Намагниченный детектор помещался в малый соленоид и пропускалось около 20 разрядов в одном направлении. После этого отклонение магнитометра, вызываемое иглой, достигало устойчивого значения и сколько бы еще разрядов не пропускалось, оставалось неизменным.

Предположим, например, что отклонение упало с 200 до 100. Игла снова намагничивалась в находящемся рядом соленоиде, и другие 20 разрядов пропускались в противоположном направлении. Если бы в этом случае первое колебание имело тенденцию намагнитить железо, а второе размагнитить его, то конечное отклонение было бы больше, так как амплитуда второго полупериода меньше, чем первого. Предположим, что отклонение упало с 200 до 150, тогда игла снова намагничивается и помещается на прежнее место.

Затем в большой соленоид помещался железный цилиндр и происходило 20 разрядов — 1) в одном направлении, 2) в другом направлении. В случае 1) отклонение упало с 200 до 103, в случае 2) — с 200 до 162.

Таким образом, видим, что влияние железного цилиндра в соленоиде сводится к существенному уменьшению амплитуды второго полупериода, ибо когда железо удалено и происходят разряды, отклонение падает с 200 до 150, а когда железо в соленоиде,— с 200 до 162.

Теперь следует рассмотреть, чем вызван этот эффект. Если бы желе-

зо увеличивало индуктивность контура, результатом этого было бы скорее возрастание амплитуды второго полупериода, а не ее уменьшение. Железо не может заметно изменить индуктивность контура, так как мы наблюдали, что воздействие от первого полупериода уменьшается очень мало — в данном случае изменение без железа составляет от 200 до 100, с железом — от 200 до 103.

Следовательно, результат должен быть приписан поглощению энергии железным сердечником и существенному увеличению активного сопротивления контура. Поглощение энергии представляет собой добавление активного сопротивления в контур и увеличивает скорость диссипации энергии в контуре.

Теперь энергию, поглощенную проводником, легко можно сравнить с энергией, поглощенной в том случае, когда в контур помещено сопротивление с очень малой индуктивностью — угольный карандаш или трубочка, содержащая электролит.

Окончательное отклонение, когда при разряде цилиндр был в соленоиде, тщательно отмечалось, затем цилиндр убирался, и в контур вводился короткий угольный стержень с большим сопротивлением, пока добавочное сопротивление не вызывало того же окончательного отклонения, какое было и при наличии в соленоиде металлического цилиндра.

Поскольку затухание в обоих случаях идентично, добавочное сопротивление должно поглощать то же самое количество энергии, что и металлический сердечник. Следовательно, поглощение, в металлическом сердечнике увеличивает импеданс контура, это возрастание импеданса может быть выражено в омах.

Сопротивление угольного стержня или электролита определялось для постоянного тока, и, воспользовавшись уравнениями, полученными Рэлеем, было найдено, что их сопротивление практически одно и то же как для постоянного тока, так и для частоты в 2 млн. колебаний в секунду, что примерно соответствует частоте разряда, так как их проводимость мала.

Действуя таким образом, легко сравнить поглощение энергии различными проводниками (табл. 1):

1. Испытательная трубочка была наполнена расплющенными в тонкие пластины проволочками из мягкого железа диаметром 0,008 *дюйм.* Чтобы обеспечить достаточно хорошую изоляцию от вихревых токов, испытательная трубочка наполнялась нефтью. Поглощение энергии в этом случае увеличивало импеданс контура на 10,25 *ом.*

2. Затем в соленоид помещалась испытательная трубка, наполненная стальными опилками. Возрастание импеданса 9 *ом.*

3. Тонкий цилиндр из мягкого железа, диаметром 1,9 *см*, длиной 14 *см.* Возрастание импеданса 3,9 *ом.*

4. Сплошной железный стержень. Возрастание импеданса 3,5 *ом.*

5. Медный или платиновый цилиндры и испытательная трубка, наполненная раствором $CuSO_4$, не дали заметного поглощения энергии.

6. Угольный стержень, однако, поглотил большое количество энергии. Возрастание импеданса контура 3,3 *ом*.

Таблица 1

Поглощение энергии различными проводниками

Поглощение энергии пропорционально возрастанию импеданса контура

Вещество	Возрастание импеданса, *ом*
Мягкое железо в виде пластин	10,25
Мягкое железо в куске	3,5
Угольный цилиндр	3,3
Медный цилиндр	Не заметно
Платиновый цилиндр	То же
Стальные стружки	9,0

Дж. Дж. Томсон [3, стр. 321] показал, что возрастание импеданса первичного контура вследствие поглощения энергии железным цилиндром длиной l и радиусом a равно

$$4\pi^2 l N^2 \left(\frac{p\mu\sigma}{2\pi}\right)^{1/2} a,$$

где $p = 2\pi n$ (n — число колебаний в секунду); N — число витков на сантиметр соленоида; μ — проницаемость железа; σ — удельное сопротивление железа.

Мы показали, что цилиндр из мягкого железа увеличивает импеданс контура на 3,9 *ом*.

Из этого уравнения можно найти грубое приближение значения μ для железа в высокочастотных полях.

Если число колебаний в секунду, вычисленное по данным разрядного контура, составляет 2 млн., $\sigma \sim 10^4$ для мягкого железа; $l = 14$ *см*; $a = 0{,}95$ *см*; $N = 2$ (почти), то получаем

$$3{,}9 \cdot 10^9 = 4\pi^2 \cdot 14\,(2^2)\left(\frac{2\pi \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 10^4 \mu}{2\pi}\right)^{1/2} \cdot 0{,}95.$$

Из этого равенства μ примерно равно 172. Это показывает, что железо имеет заметную проницаемость даже при действии таких очень быстро переменных полей.

Интересно отметить, что не обязательно наилучшие проводники поглощают наибольшее количество энергии в таких полях, в действительности имеет место прямо противоположный случай. Медный цилиндр поглощает не более $^1/_{40}$ части той энергии, которую поглощает железный цилидр тех же размеров. По характерному затухающему звуку искры всегда можно

было сказать, поглощается ли заметное количество энергии в соленоиде. Медный цилиндр, не ослаблял звук так, как железный или угольный цилиндры. Включение угольного стержня последовательно с контуром вызывало тот же звук, так как это увеличивало сопротивление контура.

VI. Сопротивление тонких проволочек высокочастотному разряду

Поскольку было показано, что железо сохраняет свои магнитные свойства в полях, которые меняются 100 млн. раз в секунду, можно было ожидать, что сопротивление железных проволочек для частот в несколько миллионов колебаний в секунду из-за концентрации тока в поверхностном слое проводника будет гораздо больше, чем для постоянного тока.

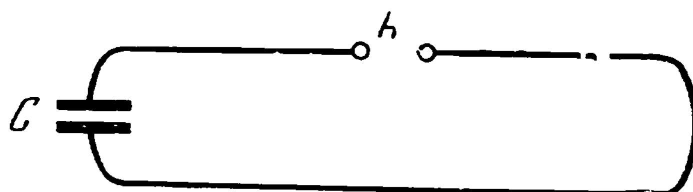


Рис. 14

До сих пор невозможно было определить сопротивление проводников для таких быстрых колебаний, поэтому представляет интерес любой метод преодоления этой трудности. Экспериментальный метод практически был тот же самый, что и при определении поглощения энергии в проводниках.

Было взято около 4 *м* железной проволоки и составлен прямоугольный разрядный контур (рис. 14). Другие проволочные соединения были выполнены из меди того же диаметра, что и железные. После ряда разрядов сначала в одном направлении, а затем в другом, наблюдалось уменьшение отклонения в «детекторе». Затем железная проволока заменялась медной того же радиуса и длины. Это обеспечивало практически неизменную индуктивность контура. Затем в контур вводилось короткое угольное сопротивление, пока уменьшение отклонения с медной проволокой и угольным сопротивлением не становилось точно таким же, как уменьшение отклонения в случае железной проволоки. Когда это достигалось, сопротивление железа оказывалось равным сопротивлению медной проволоки той же длины плюс угольное сопротивление.

Пример определения сопротивления предлагаемым методом

Когда контур составлен из железной проволоки, отклонение упало: 1) с 200 до 103 для одного направления разряда; 2) с 200 до 176,5 для противоположного направления. Когда железная проволока была убрана и заменена медной, уменьшение отклонения было таким: 1) от 200 до 101

для одного направления и 2) от 200 до 162 для противоположного направления. После добавления в разрядный контур угольного сопротивления в 8,5 *ом* уменьшение отклонения составляло: 1) от 200 до 103, 2) 200 до 176,5.

Так как уменьшение отклонения было одним и тем же в обоих случаях сопротивление железной проволоки равно 8,5 *ом* плюс сопротивление медной проволоки для конкретного периода колебаний. Далее, сопротивление медной проволоки в быстро переменных полях из уравнения Рэлея выражается следующим образом:

$$R' = \sqrt{\frac{1}{2} pLR},$$

где l — длина проволоки; R — сопротивление проволоки постоянному току. Зная период, легко вычислить это выражение. Следовательно, известно и сопротивление железной проволоки.

Чтобы очень точно определить период, использовался плоский конденсатор с эбонитом в качестве диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость эбонита была определена заранее и оказалась равной 2,2. Емкость конденсатора составляет 460 *эл.-стат. ед.*, что вычислено по размерам пластин конденсатора.

Зная параметры разрядного контура, можно вычислить индуктивность [3]: индуктивность $L = 4278$; частота $n = 2\pi\sqrt{LC} = 3{,}5\cdot 10^6$; $p = 2\pi n = 2{,}1\cdot 10^7$.

Влияние увеличения диаметра проволоки на индуктивность контура мало, так что во всех случаях число колебаний в секунду было взято равным 3 500 000. Когда определялось сопротивление железной проволоки различного сечения, в контур включалась медная проволока, диаметр которой был как можно ближе к соответствующему диаметру железной проволоки. При изучении железной проволоки диаметром 0,22 *дюйм* вместо медного проводника использовалась свинцовая труба.

Значения сопротивлений, полученные после того как к угольному сопротивлению, включенному в контур, было прибавлено вычисленное сопротивление медной проволоки на частоте 3 500 000, приведены в табл. 2.

Видно, что сопротивление проволоки из мягкого железа диаметром 0,222 *дюйм* в 125 раз превышает сопротивление этой проволоки постоянному току. Сопротивление проволоки диаметром 0,145 *дюйм* увеличивается в 70 раз по сравнению с обычным, а проволоки в 0,03 *дюйм* — примерно в 8 раз. Общий результат этого исследования подтверждает теорию, согласно которой сопротивление проводников возрастает с ростом частоты колебаний.

Приведенные здесь эксперименты получили дополнительное подтверждение в более поздних экспериментах по исследованию кругового намагничивания железа. Видно, что на частоте 3 500 000 сопротивление проволоки диаметром 0,011 *дюйм* увеличивается меньше, чем в 2 раза,

Таблица 2

Проволока	Диаметр, *дюйм*	Сопротивление постоянному току, *ом*	Сопротивление на частоте 3 500 000, *ом*
Мягкое железо	0,011	8,5	14
Мягкое железо	0,039	1,17	9,2
Стальная струна пианино	0,032	1,59	10,7
Никелевая проволока	0,043	0,59	7,2
Проволока из мягкого железа	0,145	0,07	4,9
Проволока из мягкого железа	0,222	0,032	4

по сравнению с сопротивлением постоянному току, и что сопротивление возрастает с увеличением диаметра быстрее, чем можно было бы ожидать по обычной теории.

Рэлей показал, что сопротивление проволоки с проницаемостью μ для быстро переменных полей равно

$$\sqrt{\frac{1}{2}\mu plR},$$

где R — сопротивление постоянному току.

Итак, для проволоки диаметром 0,222 *дюйм*

$$\sqrt{\frac{1}{2}\mu plR}=4;$$

подставляя $p = 2{,}1\cdot10^7$; $l = 377$; $R = 0{,}032$ *ом*, получаем уравнение для μ и находим, что в этом случае $\mu = 121$, а если мы определим μ для различной проволоки из мягкого железа, то получим

Диаметр, *дюйм*	0,011	0,039	0,145	0,222
Вычисленная проницаемость	5,8	18	87	121

Из этого видно, что кажущаяся проницаемость проволоки возрастает пропорционально радиусу. Когда радиус проволоки возрастает в 20 раз-проницаемость возрастает в 20 раз, и т. д.

Мне неизвестно, чтобы по этому вопросу ранее было сделано что-нибудь определенное, однако следующий приближенный расчет возможно дает правильное объяснение.

Предположим, что конденсатор заряжен количеством электричества Q. Максимальный ток разряда $j = pQ$ в предположении, что нет затухания по амплитуде.

Далее, если этот ток ограничен поверхностным слоем проводника, магнитная сила на расстоянии r от центра выражается следующим образом:

$$H = \frac{2j}{r}.$$

Теперь значение H в любой точке зависит только от тока, текущего вне этой точки, и, поскольку в основном ток течет только по поверхности, мы можем взять r равным радиусу проволоки

$$H = \frac{2pQ_0}{r} = \frac{2pCV_0}{r},$$

где V_0 — потенциал между наконечниками; C — емкость конденсатора.

Так как искровой промежуток был длиной около 0,1 *дюйм*, разность потенциала составляла около 10 000 *в*. Подставляя эти значения, находим

$$H \approx \frac{18{,}8}{r}.$$

Для первой проволоки $r = 0{,}011$ *дюйм* $= 0{,}027$ *см*, т. е.

$$H = \frac{18{,}8}{0{,}013} \approx 1400.$$

Приняв $B = 12\,000$, получаем $\mu = B/H \approx 9$.

Экспериментальное значение равно примерно 6, но следовало ожидать различия между этими результатами, так как сопротивление железа измерялось после последовательности разрядов в одном направлении, когда из-за большой амплитуды первого полупериода внутренняя часть проволоки практически насыщается и не обладает сколько-нибудь заметной проницаемостью, ибо ток проник через внешний слой, намагниченный в противоположном направлении вторым полупериодом. Уравнения

$$H = \frac{2j}{r}$$

и

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{Br}{2j}$$

показывают, что следует ожидать изменения проницаемости пропорционально радиусу проволоки, конечно, лишь до максимального значения проницаемости железа, равного примерно 3 000. Представленные выше значения показывают, насколько близко выполняется этот закон на практике.

Пусть

$$j = pQ_0 = \frac{1}{\sqrt{Lc}} CV_0,$$

а V_0 изменяется пропорционально искровому промежутку d. Тогда

$$j \approx \frac{\sqrt{c}}{\sqrt{L}} d,$$

$$\mu = \frac{Br}{2j},$$

а когда железо насыщено, B можно считать постоянной, т. е.

$$\mu \simeq \frac{r\sqrt{L}}{d\sqrt{c}}.$$

Следовательно, в таких полях с ростом радиуса возрастает проницаемость железа, и чем короче искровой промежуток, тем больше проницаемость, а значит и сопротивление.

Сопротивление R' на высоких частотах равно $\sqrt{{}^1/_2 \mu_0 plR}$, т. е.

$$R' \sim \sqrt{\frac{1}{2} \frac{r\sqrt{L}}{d\sqrt{c}} \frac{1}{\sqrt{Lc}} \frac{l}{r^2}} \sim \frac{1}{\sqrt{rcd}},$$

причем l постоянно.

Сопротивление железных проволок в таких полях меняется обратно пропорционально корню квадратному из радиуса, обратно пропорционально корню квадратному из емкости, обратно пропорционально корню квадратному из длины искрового промежутка и не зависит от индуктивности контура.

Возрастание сопротивления железных проволок в быстро переменных полях приписывали концентрации тока на поверхности проводника. Существуют, конечно, еще и потери энергии на гистерезис вследствие намагничивания и размагничивания железных проволок. Хотя за счет гистерезиса в стали поглощается гораздо больше энергии, чем в мягком железе, у стальной проволоки не наблюдалось большего возрастания сопротивления, чем у проволоки из мягкого железа. Поэтому влиянием гистерезиса, как фактором, определяющим возрастание сопротивления проволоки, вероятно, можно пренебречь.

Возможно, что поглощение энергии вследствие гистерезиса может быть гораздо большим на частотах в несколько миллионов колебаний в секунду, чем на частотах около 1 тыс. колебаний, но отделить влияние наведенных токов от влияния гистерезиса на поглощение энергии в железном цилиндре очень трудно.

VII. О распределении быстро переменных токов в сложных контурах и о влиянии металлических сердечников на распределение токов

Рассмотрим распределение переменного тока между соединенными параллельно проводниками ACB и ADB (рис. 15).

Пусть R и L — сопротивление и индуктивность соответственно в цепи ACB; S и N — сопротивление и индуктивность соответственно в цепи ADB.

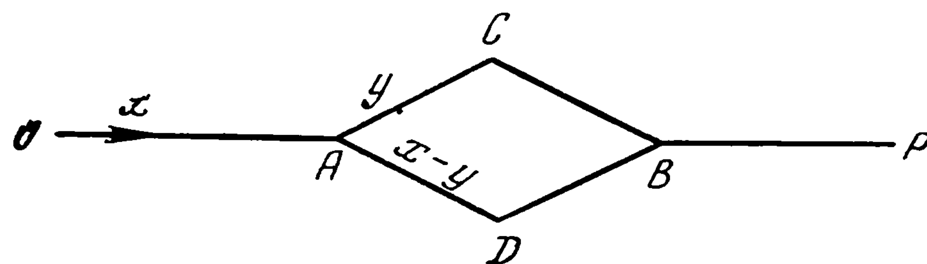


Рис. 15

Если y — ток в цепи ACB, а $x—y$ — ток в цепи ADB, то, как показано [3, стр. 513], для быстрых колебаний распределение таково:

$$y = \left\{\frac{S^2 + N^2p^2}{p^2(L+N)^2 + (R+S)^2}\right\}^{1/2} \cos(pt + \varepsilon);$$

$$x - y = \left\{\frac{R^2 + L^2p^2}{p^2(L+N)^2 + (R+S)^2}\right\}^{1/2} \cos(pt + \varepsilon'),$$

где

$$\operatorname{tg}\varepsilon = \frac{p(RN - SL)}{S(R+S) + N(L+N)p^2};$$

$$\operatorname{tg}\varepsilon' = \frac{-p(RN - SL)}{R(R+S) + (L+N)Lp^2}.$$

Максимальные токи, текущие в обеих ветвях, пропорциональны выражениям под корнем, и видно, что распределение тока на высоких частотах больше зависит от индуктивности, чем от сопротивления контура.

Были намотаны два абсолютно идентичных контура. Каждый состоял из соленоида длиной 22 *см*, диаметром 2,2 *см* и с числом витков 34. Использовалась медная проволока диаметром 0,039 *дюйм* с каучуковой изоляцией.

Когда в соленоид вводили металлический сердечник и происходил разряд, в цилиндре возникали интенсивные наведенные токи. Если ток, иногда до 100 *а*, меняется до 10 млн. раз в секунду, то наведенные токи должны быть велики. Эти наведенные токи вследствие весьма короткого времени, которое они длятся, ограничены тонким поверхностным слоем цилиндра. Но эти наведенные токи имеют тенденцию уменьшать эффективную индуктивность контура. Количество энергии, поглощенное в цилиндре, зависит от разницы фаз между прямым и обратным токами. Импеданс контура выражается следующим образом: $\sqrt{R^2 + p^2L^2}$. Интересно знать, увеличивается он или уменьшается при введении металлического сердечника.

1. В один из соленоидов был введен медный цилиндр радиусом 1 *см*. С помощью обычного детектора было обнаружено, что больший ток протекал по той цепи, в которой располагался медный цилиндр, а не по другой. Ток в одной цепи был на 8% больше, чем в другой. Далее, из выражений для распределения токов в каждой ветви видно, что знаменатели выражений одни и те же, а числители представляют собой импеданс каждой цепи. Значение $\sqrt{R^2 + p^2L^2}$ уменьшилось на 8% при введении медного цилиндра, т. е. влияние медного цилиндра приводит к уменьшению импеданса цепи.

2. Когда вместо медного вводился свинцовый цилиндр, уверенно эффекта неравного распределения нельзя было обнаружить.

3. *Магнитные цилиндры.* а) Когда сплошной цилиндр из мягкого железа вводился в соленоид, ток в этой цепи уменьшался на 3,5%. б) Отдельные проволочки из мягкого железа, тщательно изолированные одна от другой и помещенные в трубочку, уменьшали ток в своей ветви более, чем на 12%. в) Стальные спицы в трубочке также уменьшали ток в своей ветви.

Таким образом, влияние железа как сплошного, так и в виде проволочек приводит к возрастанию импеданса цепи.

Таков общий результат, полученный для частоты около 3 млн. колебаний в секунду, но невозможно решить однозначно, обязано ли возрастание импеданса в основном возрастанию R или L, или того и другого вместе. Однако из факта большого поглощения энергии железными цилиндрами наиболее вероятно, что возрастание импеданса обязано возрастанию R, а не L.

В последующих опытах использовалось гораздо более чувствительное устройство для обнаружения разницы сопротивлений и индуктивностей в цепях. Был использован дифференциально намотанный соленоид с одной катушкой в одной цепи и с подобной катушкой в другой, так что, когда токи в каждой ветви были равны по величине и фазе, на помещенный в соленоид «детектор» никакого воздействия не оказывалось. Если в какой-либо соленоид вводился металлический сердечник, равновесие сильно нарушалось, и таким способом были подтверждены результаты предыдущих экспериментов. Этот метод представляет очень удобное средство для измерения сопротивления железных проволочек, и полученные результаты вполне согласуются с предыдущими.

VIII. Круговое намагничивание железных проволок

При экспериментах по определению сопротивления железных проволочек, которые были проведены возле магнитометра, было замечено, что отклонения магнитометра очень существенно изменялись в зависимости от направления разряда, а также от числа разрядов. Причина сначала была неясна, но последующее исследование показало, что явление обязано своим происхождением намагничиванию соседних частей проволоки

проходящим через нее током. Если проволока была совсем прямой, эффект не наблюдался, если же около магнитометра бывал небольшой изгиб, отклонение менялось в зависимости от направления разрядов. Эффект был очень заметен как в случае проволок из мягкого железа, так и в случае стальной проволоки, и показывает, какие сильные мгновенные токи должны протекать по проволоке, так как постоянный ток в 10 *а* не влиял заметно на отклонение. Затем было исследовано влияние разрядов на продольно намагниченную короткую проволоку. Разряд всегда уменьшал намагниченность, независимо от того, была ли проволока из стали или из мягкого железа. Это кажущееся размагничивание железа обусловлено «круговым» намагничиванием поверхностного слоя продольным током через проволоку. Чем больше проходящий ток, тем больше уменьшение намагниченности.

Ниже в качестве примера описано несколько экспериментов по уменьшению намагниченности, когда частота разрядов составляла 3 млн. колебаний в секунду, а максимальное значение тока составляло около 100 *а*:

1. Тонкая проволока из мягкого железа, диаметром 0,01 *дюйм*; полное размагничивание.

2. Тонкая стальная проволока, диаметром 0,01 *дюйм*; полное размагничивание.

3. Стальная фортепианная струна, диаметром 0,032 *дюйм*; отклонение упало с 250 до 116.

4. Стальная игла диаметром 0,065 *дюйм*; отклонение упало с 250 до 184.

5 Толстая стальная игла диаметром 0,102 *дюйм*; уменьшение отклонения с 250 до 216.

6. Полый цилиндр из мягкого железа, толщиной 0,25 *мм*, диаметр 18 *мм*, длина 16 *см*; уменьшение отклонения с 250 до 230.

Таблица 3

Материал проволоки	Диаметр, *дюйм*	Глубина проникновения разряда, *дюйм*
Закаленная сталь	0,032	0,0051
Отожженная сталь	0,065	0,00455
То же	0,0102	0,00357
Мягкое железо	0,72	0,00044

Для испытания всех образцов использовался один и тот же конденсатор и разрядный контур; интересно вычислить глубину проникновения, предположив, что конечное отклонение определяется массой железа, не намагниченной круговым образом, т. е. массой, на которую не повлиял ток в поверхностном слое проводника (табл. 3).

Опыты подобного рода показывают, сколь мала глубина, на которую в проволоку проникает ток. Даже большие кратковременные токи передаются по тонкому поверхностному слою проводника, и величина тока быстро уменьшается от поверхности к центру.

Уменьшение отклонения, обусловленное «круговым намагничиванием» проволоки при протекании продольного тока,— самый удобный способ оценки количества электричества, протекающего в ветвях разветвленной цепи. В этом случае все токи — одной частоты, и, как было найдено из опыта, «глубина проникновения» пропорциональна максимуму тока.

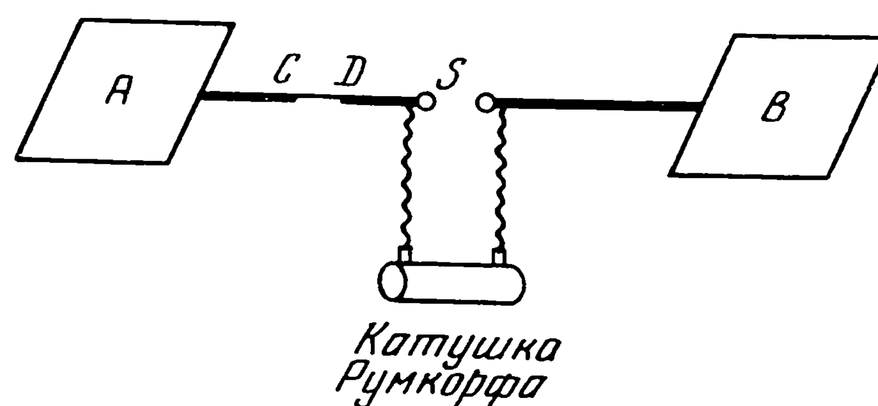


Рис. 16

Намагнитив до насыщения короткие стальные иглы и поместив их последовательно с исследуемыми цепями в сложных схемах, можно точно определить распределение тока между проводниками. При варьировании диаметра иглы можно сравнивать токи одного периода, но с самыми различными амплитудами.

Дж. Дж. Томсон предложил использовать в качестве удобного гальванометра для разрядов такого рода специальную вакуумную трубку, помещенную в соленоид. Сравнение токов в различных ветвях осуществляется путем наблюдения яркости разряда в баллоне. Однако воздействие продольного тока на намагниченность иглы дает не только качественный метод сравнения, но позволяет также получать и очень точные количественные результаты.

Выше было показано, что намагниченная игла в значительной мере размагничивается под влиянием колебательного разряда с частотой около 100 млн., т. е. с частотой, создаваемой гантельным вибратором Герца.

Пусть A и B — две металлические пластины малой емкости, а S — искровой промежуток (рис. 16). Небольшая стальная игла CD диаметром 0,01 *дюйм* была введена в цепь разряда. После прохождения нескольких разрядов отклонение стрелки, вызванное иглой, упало с 300 до 250. Это соответствует глубине проникновения разряда приблизительно на 0,00045 *дюйм*. После нескольких разрядов в том же направлении отклонение уменьшалось, пока не было достигнуто установившееся состояние точно так же, как в случае размагничивания железных игл в соленоидах.

Из величины этого эффекта видно, что тонкая намагниченная игла представляет собой очень удобный гальванометр для измерения интенсивности волн в различных частях свободно колеблющейся цепи.

Чтобы убедиться, что это именно так, использовалась экспериментальная установка Герца для доказательства существования волн вдоль проводов (рис. 17).

Пластина *B* находилась приблизительно в 10 *см* за пластиной *A*. Проволока от *B* до *C* имела длину около 5 *м*.

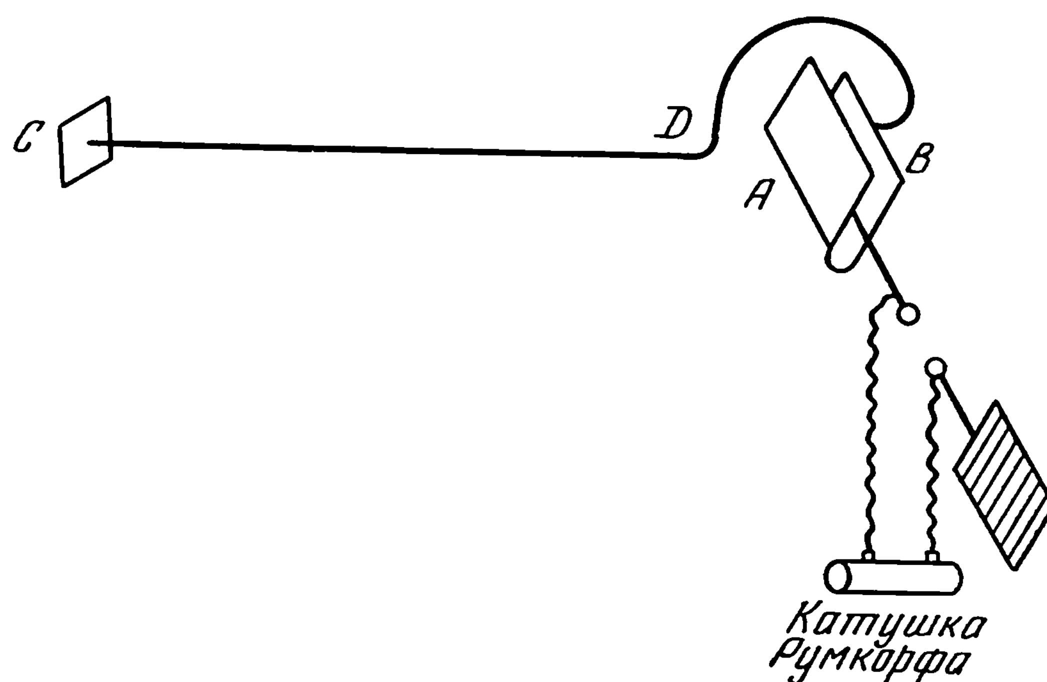


Рис. 17

Если конец *C* был свободен и изолирован и последовательно с ним располагался небольшой детектор, то разряд не оказывал никакого влияния на иглу. Если на конце *C* устанавливалась металлическая пластина, то немедленно при включении вибратора наблюдалось уменьшение отклонения на 50 делений. Это показывает, что, если конец свободен, то в точке *C* находится минимум тока, а при подсоединенной пластине ток в *C* имеет максимум. Если оставить конец свободным и передвигать иглу на различные расстояния от *C*, падение отклонений постепенно возрастает, а потом снова уменьшается.

Опыт не был продолжен, так как вопрос распространения волн вдоль проводов уже изучался многими методами. Он показывает, однако, что намагниченная игла — это очень удобный гальванометр для колебательных контуров при частотах вплоть до 500 млн. в секунду.

Влияние колебаний на тонкую стальную проволоку, независимо от того, помещена ли она последовательно или в соленоид из нескольких витков, может быть использовано как способ обнаружения электромагнитного излучения и исследования волн в свободно колеблющихся контурах.

До того как я начал это исследование, я не знал, магнитно ли железо в очень быстро переменных полях или нет. Единственная информация, которой я располагал по этому вопросу, приведена на первых страницах этой статьи. Опытные данные казались неопределенными и противоречивыми. В этом исследовании, начиная с намагничивания железа в

обыкновенном разряде лейденской банки, показано, что железо магнитно при частоте вплоть до 500 млн. колебаний в секунду. Из-за малых количеств электричества, использованных в этих процессах, опыты не были продолжены, но я не сомневаюсь, что при использовании очень тонких стальных проволочек можно показать, что железо обладает заметными магнитными свойствами при наивысших частотах, которые могут быть сейчас получены. Если молекулы железа могут следовать за изменениями магнитной силы, меняющей направление в 1 млрд. раз в секунду, то магнитная вязкость очень мала и молекулы должны двигаться так же свободно, как и под действием переменного тока с частотой 100 периодов в секунду.

Установлено, что железо поглощает энергию и обладает высокой проницаемостью в очень быстро переменных полях; поглощение энергии было точно измерено. Было исследовано сопротивление железной проволоки разряду лейденской банки и развита приближенная теория расчета наблюдаемых эффектов. Показано, что в одном случае сопротивление оказалось в 120 раз больше сопротивления постоянному току.

Было исследовано распределение токов в разветвленных цепях для нескольких случаев, и было показано, что железо в виде массивного образца или в виде тонких проволочек всегда увеличивает импеданс цепи.

Описано использование намагниченных стальных игл в качестве «детекторов» и «гальванометров», а также возможность их применения для измерения интенсивности электромагнитных волн.

В ходе исследования получены данные о природе разрядов и о затухании колебаний. В качестве приложения дана довольно подробная, хотя и незаконченная заметка «О сопротивлении искровых промежутков» — предмете, о котором, кажется, мало что известно в настоящее время.

О СОПРОТИВЛЕНИИ ИСКРОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Когда лейденская банка разряжается, яркая вспышка света служит единственным видимым проявлением энергии, запасенной в диэлектрике банки. Однако рассеяние энергии обусловлено несколькими различными причинами:

1. Искровой промежуток оказывает сопротивление разряду, и энергия рассеивается в воздушном пространстве в соответствии с законом Джоуля.

2. В проволоках и контактах разрядной цепи часть энергии также переходит в тепло. В связи с этим следует помнить, что сопротивление проволок при разряде часто во много раз больше, чем их сопротивление постоянному току.

3. Часть энергии излучается также в пространство в виде электромагнитных волн. Величина этого излучения сильно изменяется в зависимости от типа используемого конденсатора. Обыкновенная лейденская банка — плохой излучатель, а гантельный вибратор Герца — хороший, и колебания быстро затухают.

4. Часть энергии поглощается также диэлектриком вследствие молекулярного гистерезиса в стекле. Величина этой части точно неизвестна и, весьма вероятно, значительно зависит от сорта примененного стекла.

Для обыкновенной лейденской банки большая часть энергии переходит в тепло в искровом промежутке и число полных колебаний, возникающих при этом, почти полностью зависит от длины искрового промежутка. Косвенное свидетельство быстрого затухания колебаний может быть получено из опытов с резонаторами. Если разрядные цепи двух одинаковых конденсаторов будут идентичны и конденсаторы расположены в нескольких футах один от другого, то при разряде одной банки колебания возникают и в соседней цепи, а так как периоды обеих систем одинаковы, то импульсы, вызванные вибратором, приводят к искрению в резонаторе.

Расстояние, на котором это искрение может быть обнаружено, почти полностью зависит от длины искрового промежутка в цепи вибратора. Если искровой промежуток большой, никаких искр в резонаторе нельзя обнаружить на расстоянии, превышающем несколько футов, даже если первое колебание очень интенсивно. По мере того как искровой промежуток укорачивается, колебания вибратора уменьшаются по амплитуде, но становятся более устойчивыми вследствие низкого сопротивления искрового промежутка, а поскольку резонатор легче отзывается на непрерывный ряд малых импульсов, нежели на один мощный импульс, искрение можно обнаружить на гораздо большем расстоянии. При искровых промежутках длиной меньше $^1/_{10}$ *дюйм* обыкновенный разряд исключительно быстро затухает, и амплитуда второго колебания вообще меньше $^1/_5$ первого.

Если разряд происходит в цепи с известными индуктивностью и емкостью, то известен теоретический закон затухания. Ток j в момент времени t определяется выражением

$$j = \frac{CV_0}{(LC)^{1/2}} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin\frac{t}{(LC)^{1/2}},$$

где L — индуктивность цепи для высоких частот; R — сопротивление проводов и искрового промежутка; C — емкость банки; V_0 — потенциал обкладок. Максимум тока первого полупериода равен

$$j_1 = \frac{CV_0}{(LC)^{1/2}} e^{-\frac{R}{2L}\frac{T}{4}},$$

где T — период полного колебания.

Максимум тока второго полупериода

$$j_2 = \frac{CV_0}{(LC)^{1/2}} e^{-\frac{R}{2L}\frac{3T}{4}},$$

т. е.

$$\ln\frac{j_1}{j_2} = \frac{R}{2L}\frac{T}{2}. \quad \text{(A)}$$

Отношение j_1/j_2 может быть найдено с помощью уже описанного экспериментального метода, а так как величины T и L определяются параметрами конденсатора и разрядной цепи, то известно и R. Величина R состоит из сопротивления проводов и из сопротивления искрового промежутка. Сопротивление проводов можно определить по формуле Рэлея; следовательно, известно сопротивление искрового промежутка между первым и вторым полупериодами.

Для проверки результатов, полученных из приведенного выше уравнения, был использован также экспериментальный метод расчета. После того как отношение j_1/j_2 было определено с помощью изменения числа витков соленоида, в цепь было введено известное угольное сопротивление r, а отношение j_3/j_4 для первых полупериодов определялось так же, как раньше, т. е.

$$\ln\frac{j_3}{j_4} = \frac{R+r}{2L}\frac{T}{2}. \qquad (B)$$

Поделив уравнение (B) на (A), получим

$$\frac{R+r}{R} = \frac{\ln(j_3/j_4)}{\ln(j_1/j_2)},$$

следовательно, сразу известно R.

Таким же образом было определено сопротивление искровых промежутков при постоянных индуктивности и длине искры и переменной емкости. Искровой промежуток был выбран длиной $^1/_{10}$ *дюйм* между наконечниками радиусом 1 *см* (табл. 4).

Для заряда банок использовалась машина Фосса. Видно, что сопротивление искрового промежутка быстро уменьшается, по мере того как

Таблица 4

Конденсатор	Емкость	Отношение амплитуды первого и второго полупериодов	Сопротивление искрового промежутка, *ом*
Две лейденские банки, соединенные последовательно	500	2,55	50,5
Плоский конденсатор	576	2,42	49,3
Одна лейденская банка	1000	1,85	24,5
Две лейденские банки, соединенные параллельно	2000	1,84	17,2
Четыре лейденские банки, соединенные параллельно	4000	2,01	13,6
Шесть лейденских банок, соединенных параллельно	6000	2,1	10,5

Таблица 5

Длина искрового промежутка, *дюйм*	Отношение амплитуд первых двух полупериодов	Сопротивление искрового промежутка, *ом*	Длина искрового промежутка, *дюйм*	Отношение амплитуд первых двух полупериодов	Сопротивление искрового промежутка, *ом*
0,014	1,31	14,8	0,1	2,42	51,3
0,028	1,44	19,8	0,142	2,91	60
0,089	2,31	47,8	0,231	4,4	81

увеличивается емкость конденсатора, т. е. увеличивается количество электричества, проходящего через искровой промежуток.

Далее было определено влияние изменения длины искры при постоянных емкости и индуктивности (табл. 5).

Эти наблюдения показывают, что сопротивление искрового промежутка растет вместе с его длиной. У коротких искровых промежутков низкие значения сопротивления, у длинных — высокие.

Во всех этих опытах для заряда банок применялась машина Фосса. Если машину Фосса заменить катушкой Румкорфа, то при определенных условиях, возможно, сопротивление будет много меньше.

Если гантельный вибратор Герца возбуждался машиной Фосса, то никакого эффекта обнаружить нельзя было. При использовании катушки Румкорфа в соседних цепях возникают колебания, но только когда катушка создает определенный вид искры. Эта искра была названа Герцем «активной», и возможно, что сопротивление искрового промежутка при «активной» искре гораздо меньше, чем при обычном разряде. Обычно при искровом промежутке размером около $^{2}/_{3}$ *см* колебания затухают очень быстро, и второй полупериод по амплитуде не составляет и половины от первого.

В ходе одного опыта я попытался узнать, есть ли какая-либо разница в сопротивлении промежутка при использовании машины Фосса или катушки Румкорфа. Результаты получились такими: 1) Катушкой Румкорфа конденсатор заряжался до немного большей разности потенциалов, чем машиной Фосса при той же длине искрового промежутка. 2) Сопротивление искрового промежутка для разряда катушки Румкорфа было немного меньше, чем в случае использования машины Фосса.

Таковы результаты нескольких предварительных опытов по этому мало изученному вопросу. В будущем я собираюсь провести более подробные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lodge O.* Modern Views of Electricity.
2. *Fleming.* Alternate Current Transformer, v. 1.
3. *Thomson J. J.* Recent Researches, Phil. Mag., 1891.
4. *Trowbridge J.* Phil. Mag., 1891.
5. *Gray.* Absolute Measurements.
6. *Lodge O.* Proc. Roy. Soc., June 4, 1891, 33.

1897

2

МАГНИТНЫЙ ДЕТЕКТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛН И НЕКОТОРЫЕ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ *

Введение

В настоящей статье приводятся результаты исследования намагничивания железа высокочастотным разрядом, а также обсуждаются вопросы применения намагниченных стальных игл для обнаружения и измерения очень быстро меняющихся токов.

Будет показано, что эти детекторы представляют собой очень простое средство для изучения многих явлений, связанных с высокочастотными разрядами, и могут применяться в широком диапазоне частот. Подобные детекторы можно использовать не только в обычных контурах с лейденской банкой, но и в качестве чувствительного инструмента для исследования волн вдоль проводов и в свободных коротковолновых колебательных контурах.

Было обнаружено также, что эти детекторы являются чувствительными приборами для обнаружения излучения от вибратора Герца на больших расстояниях.

В статье исследуются следующие вопросы:

1. Намагничивание железа высокочастотным разрядом и исследование этого эффекта на коротких стальных иглах.

2. Магнитные детекторы и их применение:

а) обнаружение электромагнитного излучения в свободном пространстве; волны детектировались на расстоянии более полумили от вибратора;

б) волны вдоль проводов;

в) затухание колебаний:
сопротивление железных проводов,
поглощение энергии проводниками;

г) определение периода разряда лейденской банки и определение констант разрядного контура.

Давно известно, что стальные иглы, помещенные внутри спирали, намагничиваются, если через эту спираль разрядить лейденскую банку.

В 1842 г. аномальный характер намагничивания стальных игл натолкнул профессора Генри на мысль, что разряд лейденской банки происходит колебательным образом. Генри, Абрия, а также некоторые другие исследователи пытались определить с помощью стальных игл направле-

---

* Philosophical Transactions of the Royal Society, 1897, ser. A, 189, 1—24.

ние наведенного во вторичных и последующих цепях тока при разряде лейденской банки через первичную цепь. Однако полученные результаты были противоречивы.

Рэлей [1] намагничивал стальные иглы в спирали, исследуя максимальный ток при размыкании обычных индукционных цепей.

Общий вопрос о намагничивании железа быстро колеблющимися токами разбирался во многих экспериментальных работах. Рэлей, работая с переменными токами, колеблющимися с частотой до 1050 раз в секунду, обнаружил, что сопротивление железа при этом значительно возрастает. Он вычислил также величину проницаемости железа. Троубридж [2] показал, что железная проволока сильно демпфирует колебания разряда лейденской банки, и из этих результатов получил приближенное значение для проницаемости исследованных образцов.

Бьеркнес [3] установил, что колебания резонатора Герца затухают намного быстрее, если резонатор сделан из железа, нежели в том случае, когда он сделан из немагнитного материала.

Намагничивание железа при разряде лейденской банки

Если взять кусок стальной проволоки длиной в несколько сантиметров и поместить его в соленоид, образованный несколькими витками проводника, то после прохождения разряда проволока становится магнитной. Вообще говоря, это намагничивание мало, но его величина несколько возрастает, если в одном и том же направлении пропустить несколько разрядов.

На рис. 1 показана схема установки: A и B — полюса машины Вимшурста или индукционной катушки; C — конденсатор; S — воздушный разрядник; D — соленоид, в который помещается стальная проволока. Обнаружено, что при зарядке конденсатора до величины напряжения, меньше пробойного, намагничивания иглы не происходит.

Во всех описанных ниже опытах намагничивание игл измерялось с помощью небольшого зеркального магнитометра. Игла могла находиться в соленоиде, и тогда магнитометр помещался рядом с ней, или же после каждого опыта игла вынималась и затем определялась ее намагниченность. Когда бралась проволока одной и той же длины, но различного диаметра, то намагниченность оказывалась приблизительно пропорциональной диаметру проволоки. Этого следовало ожидать, так как силы намагничивания действуют только в тонком слое вблизи поверхности иглы, и поэтому величина намагниченности зависит больше от величины поверхности, чем от площади сечения.

Чтобы определить точно, по какому закону сталь намагничена в глубь поверхности, мы воспользовались методом растворения железа в кислоте. Исследуемая игла помещалась в стеклянный сосуд, расположенный рядом с магнитометром, работающим в апериодическом режиме. Затем сосуд заполнялся разбавленной азотной кислотой и поддерживался при

постоянной температуре. Как только кислота покрывала иглу, начинался процесс растворения, и мы измеряли отклонение магнитометра в зависимости от времени. Таким способом можно было измерить величину намагниченности железа и наблюдать за процессом намагничивания. Из предварительных опытов с *однородно* намагниченными иглами было найдено, что под действием кислоты диаметр проволоки со временем уменьшается равномерно.

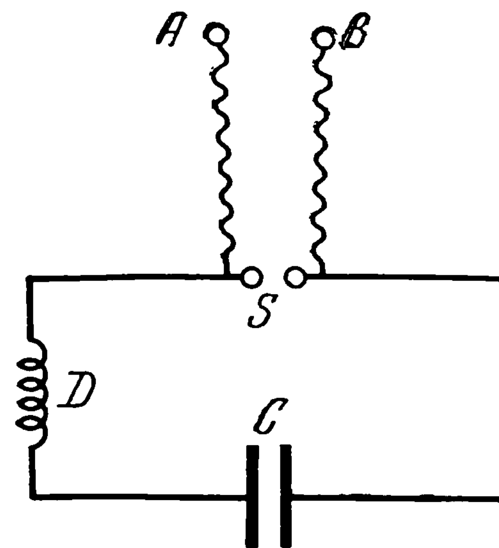


Рис. 1

Пусть I — интенсивность намагниченности тонкого кругового слоя, расположенного на расстоянии x от центра иглы, а M — отклонение магнитометра в какой-то момент времени. Тогда $\int_0^r I \cdot 2\pi r\, dr$ пропорционален M; таким образом Ir пропорционально dM/dr.

Пусть a — радиус проволоки в начале опыта. Как мы показали, $a - r$ пропорциональна t — времени действия кислоты.

Таким образом, $a - r = \varkappa t$, где $\varkappa$ — постоянная величина, и $-dx = \varkappa dt$. Поэтому величина I изменяется как

$$\frac{1}{a - \varkappa t} \frac{dM}{dt}.$$

Если построить кривую, отложив по оси ординат отклонение магнитометра, а по оси абсцисс — время действия кислоты, то величина dM/dt в любой точке будет равна тангенсу угла наклона кривой к оси x в этой точке. Таким образом, из экспериментальной кривой можно полностью определить изменение величины I.

В качестве примера приведем кривую намагниченности отрезка фортепианной струны длиной 4 *см* и диаметром 0,08 *см*, которая помещалась в соленоид с плотностью намотки два витка на сантиметр (рис. 2). Частота разряда составляла около 3 млн. периодов в секунду. По оси ординат отложено отклонение магнитометра, а по оси абсцисс — глубина, на которую кислота растворяла железо, считая от его поверхности. Каждое деление на оси ординат соответствует глубине 0,00057 *см*.

В начале опыта магнитометр отклонялся на 85 делений. Как только игла начинала растворяться, отклонение быстро увеличивалось до 156 и оставалось в таком положении некоторое время, а затем быстро уменьшалось до нуля; диаметр иглы при этом составлял 0,032 *см*, следовательно, намагниченность проникла на глубину 0,024 *см*.

Если по полученной кривой рассчитать величину I, т. е. интенсивность намагниченности от поверхности внутрь образца, то видно, что поверхностный слой намагничен в одном направлении, а внутренний слой —

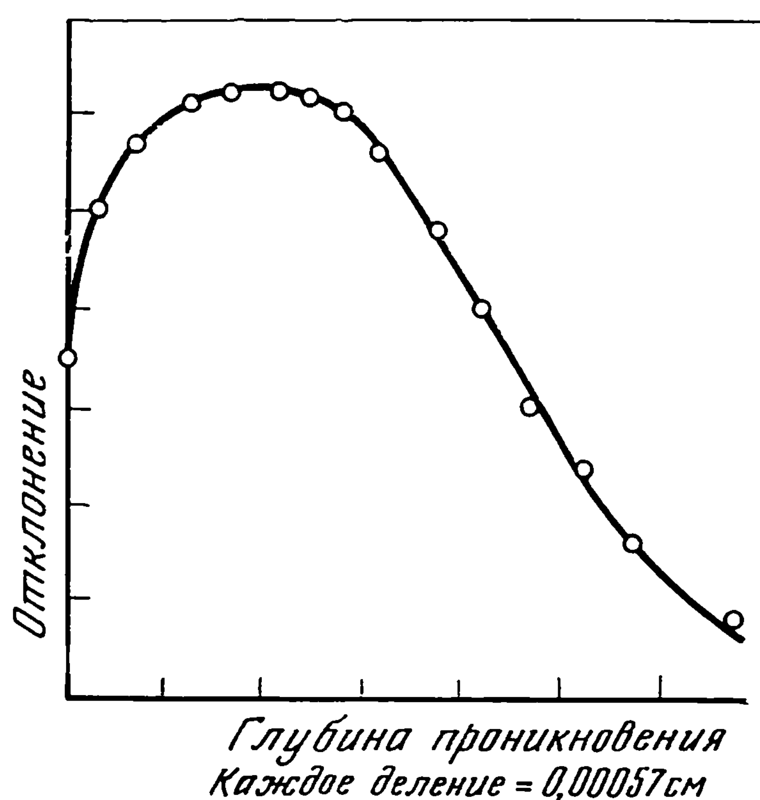


Рис. 2

в противоположном. Отсюда ясно, что ток при разряде совершает только два полупериода колебания, происходящие в противоположных направлениях. Мы провели много опытов с растворением игл, намагниченных в различных условиях, и каждый раз наблюдалась та же особенность, хотя из других опытов известно, что разряд, прежде чем затухнуть, совершает большое количество сильных колебаний.

Когда мы подвергли действию разряда иглу, намагниченную до насыщения, то ее намагниченность всегда уменьшалась, а при растворении железа наблюдался тот же эффект,— поверхностный слой намагничивается в направлении, противоположном по отношению к внутреннему магнетизму.

Так как при разряде лейденской банки, вообще говоря, происходит несколько полных колебаний, прежде чем они полностью затухнут, то следовало бы ожидать либо полного размагничивания поверхностного слоя однородно намагниченной иглы, либо проявления в нем нескольких колебаний противоположного направления. Наблюдаемое явление можно объяснить, если принять во внимание размагничивающую силу, действующую на короткую иглу со стороны ее концов. Во время первой половины колебания, когда игла размагничивается, размагничивающая сила добавляется к внешней силе, а во время обратного колебания вычитается из нее. Таким образом, во время обратного колебания поверхностный слой, на который действовало прямое колебание, не может снова полностью намагнититься, и внутри железа остается некий тонкий слой, намагниченный в первоначальном направлении. После того как пройдет следующее колебание, в том же направлении добавится еще слой и т. д.; в результате поверхность иглы намагнитится в направлении, противоположном намагниченности внутренней части материала.

Если сильно намагниченные иглы одного диаметра, но различной длины поместить в один и тот же соленоид, то, чем короче игла, тем сильнее уменьшается ее магнитный момент после разряда. Это объясняется размагничивающим влиянием концов, которое тем больше, чем короче игла.

Обнаружено также, что при пропускании нескольких разрядов одного за другим, показания магнитометра с каждым разрядом все меньше отличаются, пока, наконец, не достигается некоторое постоянное значение, и дальнейшие разряды уже никакого заметного действия на магнетизм иглы не оказывают.

В табл. 1 показано, как зависит намагниченность от длины иглы (при постоянном диаметре) и от числа действовавших на иглу разрядов (диаметр иглы 0,08 *см*; частота — около 3 млн.).

При измерениях, результаты которых приведены выше, все иглы помещались на таком расстоянии от магнитометра, чтобы он давал одно и то же отклонение, равное 250. Из этих результатов видно, что для иглы длиной 10,5 *см* отклонение падает с 250 до 188, тогда как для короткой иглы длиной 0,75 *см* отклонение падает с 250 до 50, хотя обе иглы находились в совершенно одинаковых условиях. Наиболее заметно отклонение уменьшается после первого разряда, а после прохождения десяти разрядов оно почти достигает стационарного значения.

Всякий раз, когда *намагниченная* игла помещалась в соленоид, через который пропускался разряд, ее намагниченность уменьшалась, причем падение намагниченности при любом размере иглы зависело от магнитной силы в соленоиде и от периода колебания. Это происходит в любом опыте, независимо от того, с чем мы имеем дело — с лейденской банкой или же со свободным вибратором, который обычно устанавливается в приемниках Герца.

С другой стороны, ненамагниченные иглы, помещенные в контур с малым затуханием, существенно не намагничиваются, так как каждое последующее колебание разрушает действие предыдущего. С проволокой из мягкого железа наблюдаются те же явления, что и со стальной, однако для сохранения намагниченности необходима достаточно длинная проволока, что представляет известную трудность. Вообще говоря, в данном случае влияние на иглу носит поверхностный характер и величину размагничивания нельзя выразить через намагничивающую силу каким-либо простым образом.

После каждого опыта мы вынимали иглу и помещали ее в соленоид, через который пропускался постоянный ток, достаточный, чтобы намагнитить сталь до насыщения. Таким образом, после каждого опыта иглу можно было быстро привести в состояние, которое она имела до опыта; оказалось, что результаты следующих один за другим опытов со стальными иглами хорошо между собой согласуются.

Таблица 1

Число разрядов	Длина иглы, *см*					Число разрядов	Длина иглы, *см*				
	10,5	6,4	3,2	1,6	0,75		10,5	6,4	3,2	1,6	0,75
0	250	250	250	250	250	10	190	170	130	107	57
1	204	190	166	150	114	20	189	166	125	102	54
2	199	182	155	135	88	50	188	162	120	98	50
5	195	175	138	115	64						

Распространение разряда вдоль намагниченного провода

Если отрезок фортепианной струны длиной в несколько сантиметров включить последовательно в разрядный контур, то, благодаря «круговому» намагничиванию провода при прохождении разряда, магнитный момент такой иглы уменьшается. При растворении в кислоте у иглы обнаруживается тонкий слой, намагниченный в направлении, противоположном первоначальной намагниченности, что является результатом действия размагничивающих сил иглы и магнитных сил от тока, протекающего по проводу.

Магнитная сила, действующая в любой точке провода, определяется выражением

$$H = \frac{2\gamma}{r},$$

где γ — ток через проводник, протекающий внутри круга, концентрического с поверхностью проводника и проведенного через выбранную точку. На поверхности провода эта величина равна

$$H = \frac{2\gamma}{a},$$

где a — радиус провода.

Если предположить что μ — проницаемость железного провода — постоянна, то максимальное значение тока в любой точке проводника уменьшается в геометрической прогрессии, если расстояние от этой точки до поверхности проводника увеличивается в арифметической прогрессии. Как будет показано в разделе «Сопротивление железных проводников...», токи фактически спадают еще сильнее, чем это следует из теории, поскольку при уменьшении амплитуды тока в глубь проводника значение μ растет.

На поверхности тонкого провода магнитная сила много больше, чем на поверхности толстого. Следует ожидать, таким образом, что у толстого намагниченного провода, вдоль которого распространяется ток, глубина поверхностного слоя окажется меньше, чем у тонкого; это действительно подтверждается на опыте.

Тонкий стальной провод диаметром 0,025 *см* был полностью размагничен разрядом. При этом максимальная величина тока через провод составляла около 100 *а*, и соответственно величина магнитной силы на поверхности провода составляла около 1600 *эл.-стат. ед.* Жесткий стальной провод диаметром 0,08 *см* можно было размагнитить только частично, причем отклонение по шкале уменьшалось с 250 до 116 делений.

В качестве примера приведем результаты нескольких опытов по размагничиванию железных проволочек при частоте разряда около 3 млн. периодов в секунду и максимальном значении тока около 100 *а*:

1. Тонкий провод из мягкого железа } диаметр 0,025 *см*; полностью
   Тонкий стальной провод } размагничивается

2. Стальной провод диаметром 0,08 *см*; отклонение уменьшается с 250 до 116.

3. Стальной провод диаметром 0,16 *см*; отклонение уменьшается с 250 до 184.

4. Стальной провод диаметром 0,25 *см*; отклонение уменьшается с 250 до 216.

5. Длинный тонкостенный цилиндр из мягкого железа толщиной $^1/_4$ *см* и диаметром 1,8 *см*; отклонение уменьшается с 250 до 230.

При исследовании всех этих образцов мы использовали один и тот же конденсатор и работали при одинаковом токе разряда; интересно сравнить, на какую глубину проникал ток разряда в намагниченное железо, если предположить, что в конечном отклонении можно пренебречь «круговым» намагничиванием всей массы железа (табл. 2).

Таблица 2

Провод	Диаметр, *см*	Глубина проникновения разряда, *см*
Жесткий стальной провод	0,08	0,013
Мягкий стальной провод	0,16	0,011
Мягкая сталь	0,25	0,009
Цилиндр из мягкого железа	1,8	0,0011

Опыты такого рода показывают, что в железный провод токи проникают на небольшую глубину. В поверхностном слое проводника текут очень большие мгновенные токи, которые быстро спадают внутрь проводника. В цепь небольшого плоского вибратора Герца была помещена тонкая намагниченная стальная проволока. После нескольких последовательных разрядов отклонение магнитометра, расположенного около такой иглы, упало с 300 до 250. Это говорит о том, что в железе толщина слоя, на который влияет разряд, составляет около 0,0011 *см*.

Во многих случаях вместо иглы, помещаемой в соленоид, для приближенного сравнения токов в различных сложных цепях предпочтительнее использовать детектор «продольного» типа. Таким удивительно чувствительным детектором переменных токов малой интенсивности служит тонкая намагниченная стальная проволочка, включенная последовательно в контур. Для включения детектора в цепь к концам стальной иглы припаиваются медные проводники, и игла располагается вблизи магнитометра. Вокруг иглы наматывается намагничивающий соленоид и после каждого опыта через него пропускается постоянный ток, который намагничивает иглу до насыщения.

Чтобы сравнивать в сложных цепях интенсивность колебаний с одинаковым периодом, можно использовать как детектор «продольного» типа, так и «соленоидальный» детектор. Далее будет описан соленоидальный детектор наиболее удачной конструкции, с помощью которого можно сравнивать интенсивности первого и второго полупериодов колебания.

Обнаружение волн в свободном пространстве

Как было показано, величина размагничивания намагниченной иглы зависит от толщины провода и количества витков на сантиметр в обмотке намагничивающего соленоида.

Если на небольшой отрезок намагниченной стальной проволоки намотать много витков провода, то такое устройство может служить очень чувствительным детектором электрических колебаний в проводнике, если амплитуда этих колебаний чрезвычайно мала. На этом принципе работает описываемый здесь детектор электрических волн, который, как оказалось, может служить чувствительным инструментом для обнаружения волн Герца на больших расстояниях от вибратора.

Игла детектора представляла собой 20 отрезков тонкой стальной проволоки диаметром 0,007 *см* и длиной около 1 *см*, изолированных один от другого шеллаком. Прямо на иглу был намотан соленоид, образованный двумя слоями тонкого провода с намоткой около 80 витков на сантиметр. Поскольку диаметр соленоида был очень мал, на катушку пошло всего около 15 *см* провода. Этот небольшой детектор был помещен в одном конце стеклянной трубки, закрепленной на деревянном основании, а выводы детектора были подсоединены к ртутным чашкам.

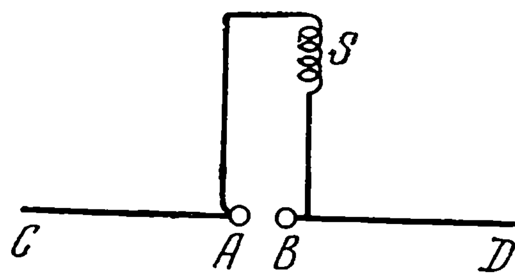


Рис. 3

На рис. 3 буквой S обозначена игла детектора и соленоид, намотанный на нее; A и B — ртутные чашки; CA и BD — два прямых прута, служащие приемниками, причем один из концов каждого прута помещен в ртутную чашку.

Игла детектора была сильно намагничена и помещена рядом с небольшим магнитометром, а отклонение магнитометра, вызванное иглой, компенсировалось дополнительным магнитом.

Если приемные провода были параллельны электрической силе волны от вибратора, то в цепи приемника возникали колебания, поверхностные

слои иголок размагничивались, и в результате стрелка магнитометра испытывала соответствующее отклонение.

Величина отклонения зависит, конечно, от амплитуды колебаний, установившихся в приемнике, а следовательно, и от расстояния до вибратора.

Опыты по обнаружению волн на больших расстояниях

Мы работали с вибратором Герца, имеющим пластины площадью 40 *см*^{2} и короткий разрядный контур; мы получили достаточно большое отклонение магнитометра на расстоянии 40 ярдов, причем волны проходили через несколько толстых стенок, расположенных между вибратором и приемником.

В дальнейших опытах была поставлена задача — определить максимальное расстояние от вибратора, на котором можно обнаружить электромагнитное излучение.

В этих опытах использовался вибратор, состоящий из двух цинковых пластин, размером 6 *фут* на 3 *фут*, между которыми помещался короткий разрядный контур размером около 30 *см*. Вибраторы с большими пластинами одинаково эффективно возбуждаются и машиной Вимшурста и катушкой Румкорфа.

Первые опыты проводились в лаборатории Кембриджа, причем приемник находился в одном из дальних зданий. Достаточно большой эффект был получен на расстоянии около четверти мили от вибратора, и, судя по величине отклонения, эффект можно было бы заметить на расстоянии в несколько раз большем.

Когда вибратор был расположен на верхнем этаже Кавендишской лаборатории, был получен небольшой, но вполне заметный эффект в здании на расстоянии около полумили по прямой. В этом случае волны, прежде чем достигнуть приемника, должны были пройти через несколько кирпичных и каменных стен, а также через много больших строений, расположенных между вибратором и приемником. Длина волны, которую излучал вибратор, была, вероятно, около 6—7 *м*, и волны такой длины, по-видимому, должны очень слабо затухать при прохождении через обычные кирпичные стены.

В опыте, выполненном в Кавендишской лаборатории, было обнаружено, что наличие шести толстых стен и других непрозрачных предметов между вибратором и приемником не уменьшает существенно эффекта. Когда вибратор находился на верхнем этаже лаборатории, сильный эффект можно было наблюдать во всем здании, несмотря на стены и перегородки.

Было проведено большое число опытов по выяснению влияния длины и диаметра приемных проводов. Если использовался сильно апериодический вибратор, т. е. пластины с небольшой индуктивностью, то отклонение постепенно возрастало при увеличении длины приемных проводов,

достигая некоторого максимума, величина которого при дальнейшем увеличении длины не изменялась.

Было обнаружено, что на показания детектора площадь сечения приемных проводов практически не влияет. Тонкий провод и толстый стержень при одинаковой длине давали одинаковый эффект; металлическая пластина шириной 6 *см* давала то же отклонение, что и тонкий провод.

Если мы использовали не один провод, а два, расположенных параллельно, то получался тот же самый эффект, хотя провода располагались на некотором расстоянии один от другого. Любое число параллельных проводов оказывало такое же действие, как один проводник или пластина.

Мы не могли определить, когда намагничена игла — во время первого полупериода колебания в приемнике или во время второго. Поскольку в этом опыте использовался почти апериодический вибратор, то это означает, что колебания в приемнике затухали очень слабо. Когда же к контуру присоединялся короткий угольный стержень, то отклонение сильно уменьшалось.

Как оказалось, в приемном контуре невозможно намагнитить мягкое железо или сталь ввиду того, что амплитуда колебаний затухает медленно. Иглу детектора можно было оставлять в контуре и проводить целую серию наблюдений, за исключением тех опытов, когда ток в приемной цепи от опыта к опыту постепенно возрастал. В этих случаях детектор нужно было размагнитить и ставить на место после каждого измерения. Было обнаружено, что в серии опытов, проведенных в одинаковых условиях, отклонение было очень стабильным.

Связь между электрической силой в приемнике и отклонением стрелки магнитометра можно легко определить, помещая приемные провода под различными углами. Когда приемник расположен симметрично по отношению к вибратору, отклонение максимально, если приемные провода параллельны оси вибратора, а электрическая сила, действующая вдоль приемника при отклонении от положения максимума, изменяется как косинус угла отклонения.

Мы обнаружили, что в опытах с плоскими вибраторами отклонение почти не зависит от яркости искрового промежутка и длительное время остается практически постоянным. В опытах с маленькими цилиндрическими вибраторами, которые использовались Герцем вместе с параболическими отражателями, отклонение непрерывно меняется в зависимости от состояния искровых электродов, и такие вибраторы трудно применять в количественных опытах.

Было проведено несколько опытов, в которых мы пытались прямо обнаружить магнитную силу волнового фронта. Для этого применялась связка тонких проволочек, изолированных одна от другой и намагниченных до насыщения. Они располагались в направлении магнитного смещения, однако магнитные силы были слишком малы, и их можно было наблюдать только совсем близко от вибратора.

Волны вдоль проводов

Детектор, составленный из тонких изолированных проволочек, может служить достаточно чувствительным устройством для исследования волн, распространяющихся вдоль проводов, если вокруг иглы детектора намотать только один виток провода. Так как уменьшение магнитного момента почти пропорционально амплитуде тока, то можно, хотя и очень приблизительно, сравнить интенсивность тока в различных точках.

В качестве свободно колеблющегося контура был использован обычный прибор Герца (рис. 4).

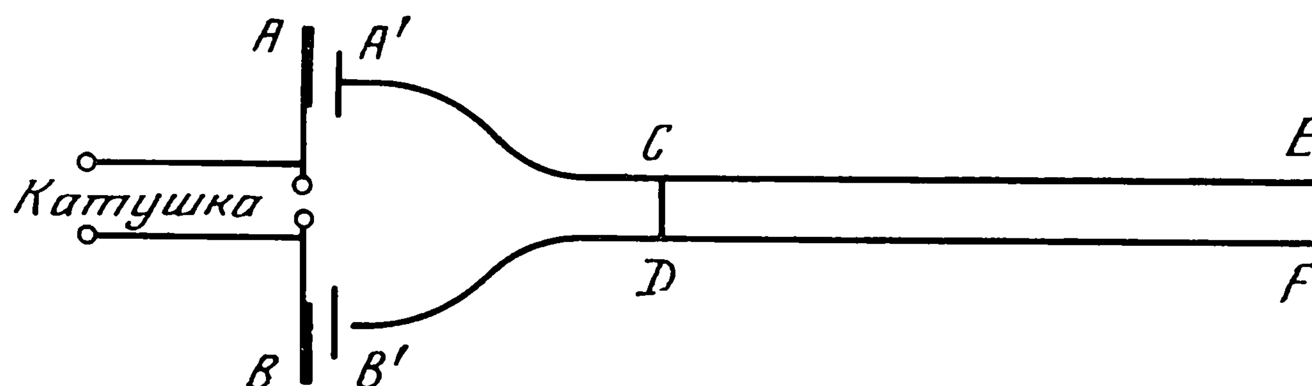


Рис. 4

Рядом с A и B — двумя пластинами, установленными вертикально, установлены малые пластины A' и B', от которых протянуты длинные провода $A'E$ и $B'F$. Концы проводов в точках E и F соединены неподвижной перемычкой, а детектор вместе с небольшим магнитометром расположен посредине между точками E и F.

Скользящая перемычка CD передвигалась до тех пор, пока стрелка детектора не упала до минимальной величины. Это положение перемычки можно определить очень точно, поскольку при перемещении перемычки на 1 *см* величина отклонения существенно изменялась. Затем детектор помещался в различные точки цепи CE, где определялась амплитуда тока. Мы обнаружили, что ток максимален в точке C и посредине перемычки EF. Посредине провода CE совершенно отчетливо обнаружен узел. Таким образом, длина $CEFD$ составляет половину длины волны.

Поскольку до сих пор единственным средством для точного исследования волн вдоль проводов служил болометр, то было бы интересно установить, имеет ли магнитный детектор чувствительность того же порядка, что и болометр.

Для этого мы использовали, как и в опытах Рейбена, две стеклянные трубки, скользящие вдоль проводов CE и DF, на каждую из которых был намотан один виток проволоки. Но вместо тонкого проволочного болометра последовательно с этими двумя витками была включена игла детектора, на которую было навито несколько витков провода. Чтобы почти полностью размагнитить иглу, достаточно было зарядить и разрядить маленькие конденсаторы, образованные прямыми проводами и намотанными на них маленькими катушками. Такой метод позволил обнаружить

движение чрезвычайно небольших количеств электричества, а чувствительность системы оказалась сравнимой с чувствительностью болометра.

В исследованных длинных проводах мы не смогли обнаружить заметного затухания, что, как нам кажется, говорит о почти полной независимости колебаний в проводах и в питающем вибраторе.

Если к полюсам машины Вимшурста последовательно с разрядным промежутком подсоединить 1 или 2 *м* провода, то в нем обнаруживается быстро колеблющийся ток. Изменение тока вдоль провода можно легко определить с помощью чувствительного детектора с несколькими намотанными на него витками.

Если к любой части разрядного контура с лейденской банкой подсоединить небольшие провода, то в них всегда возникают быстрые колебания. Каждый из этих небольших контуров стремится колебаться со своим собственным периодом, однако вся картина сильно усложняется вследствие колебаний в основном контуре.

Затухание колебаний

Намагниченные иглы помогают просто и быстро определять затухание колебаний в разрядном контуре.

Пусть L — самоиндукция разрядного контура для переменного тока; C — емкость конденсатора; R — сопротивление проводов и воздушного разрядного промежутка; V_0 — потенциал, до которого заряжен конденсатор. Ток γ в любой момент времени определяется из выражения

$$\gamma = \frac{CV_0}{(LC)^{1/2}} e^{-R/2Lt} \sin \frac{t}{(LC)^{1/2}} .$$

Экспоненциальный член учитывает только потери энергии, аналогичные трению, и не учитывает излучение в пространство. В опыте, который здесь рассматривается, в качестве конденсатора использовалась лейденская банка, в которой потери на излучение малы.

Если принять, что R постоянно, то амплитуда тока затухает со временем в геометрической прогрессии.

Рассмотрим два небольших одинаковых соленоида A и B с катушками, намотанными в различных направлениях, которые включены последовательно в колебательный контур. В соленоиды A и B вставлены две намагниченные иглы, северные полюса которых смотрят в одном направлении. Оказывается, что после разряда в контуре магнитные моменты этих игл уменьшаются неодинаково.

Пусть α_1, α_2, α_3,... — полупериоды колебания разряда в одном направлении; β_1, β_2, β_3,... — полупериоды колебания разряда в противоположном направлении.

Предположим, что в полупериод α_1 игла в соленоиде A дополнительно намагничивается. Но поскольку она уже намагничена до насыщения, ее

намагниченность не изменится. В течение полупериода β_1 поверхностный слой иглы размагничивается, полупериод α_2 стремится скомпенсировать действия полупериода β_1 и т. д. В соленоиде B полупериод α_1 размагничивает иглу, β_1 стремится намагнитить ее в первоначальном направлении и т. д. Поскольку максимальное значение тока в полупериод α_1 больше, чем максимальное значение тока в полупериод β_1, то игла в соленоиде B будет размагничена сильнее, чем игла в соленоиде A.

Но если мы в соленоиде A увеличим число витков на 1 *см* так, чтобы эффект для обеих игл стал одинаковым, то *предполагая* уменьшение тока в геометрической прогрессии, получим, что максимальное значение магнитной силы, действующей на иглу A в течение полупериода β_1, равно максимальному значению магнитной силы на иглу B в течение полупериода α_1.

Пусть γ_1 и γ_2 — максимальные значения тока в первом и втором полупериодах колебания; n_1 и n_2 — число витков на сантиметр в соленоиде A и в соленоиде B.

Тогда, поскольку

$$4\pi n_1\gamma_1 = 4\pi n_2\gamma_2, \qquad \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{n_1}{n_2},$$

а отношение второго полупериода к первому известно, то отсюда определяется затухание. Кроме того, можно определить и действительное сопротивление цепи.

Теперь

$$\gamma_1 = pCV_0 e^{-\frac{R}{2L}\frac{T}{4}},$$

где T — период полного колебания и

$$p = \frac{1}{(LC)^{1/2}},$$

$$\gamma_2 = pCV_0 e^{-\frac{R}{2L}\frac{3T}{4}}.$$

Отсюда

$$e^{-\frac{R}{2L}\frac{T}{2}} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \rho_1$$

и

$$\ln\rho_1 = -\frac{R}{2L}\frac{T}{2}. \qquad (1)$$

Поскольку L и T — постоянные разрядного контура — известны, а величина ρ_1 определяется из опыта, то отсюда определяется значение R.

Чтобы не определять постоянных разрядного контура, мы вводили в контур дополнительное известное сопротивление r. Если взять в качестве такого сопротивления электролит — раствор сульфата цинка с цинковыми

электродами, то, как показали опыты, его сопротивление постоянному и быстро изменяющемуся току практически одинаково, так как удельное сопротивление электролита очень велико.

Пусть ρ_2 — отношение амплитуд двух полупериодов колебания при сопротивлении цепи, равном $R + r$. Тогда

$$\ln \rho_2 = -\frac{R+r}{2L}\frac{T}{2}. \qquad (2)$$

Разделив (2) на (1), получим

$$\frac{R+r}{r} = \frac{\ln \rho_2}{\ln \rho_1},$$

т. е. R выражается через известное сопротивление r.

На практике вместо метода двух соленоидов мы применяли следующий метод, теоретически ему эквивалентный.

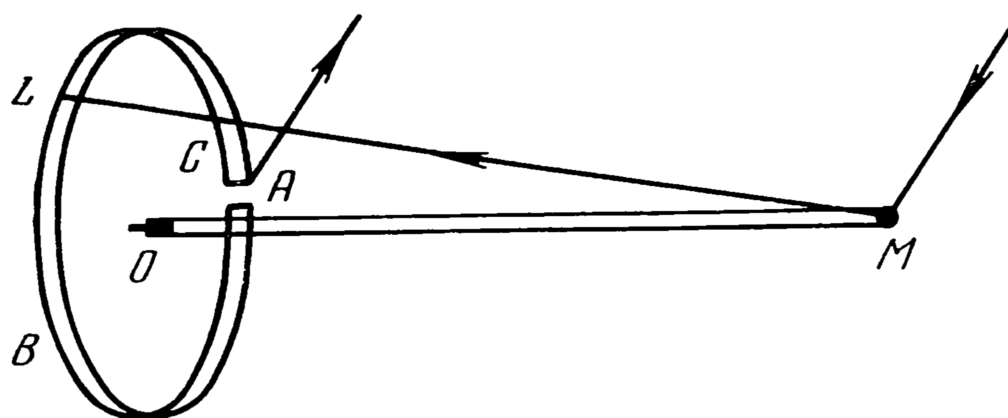


Рис. 5

Мы взяли узкую полоску цинка ABC (рис. 5) и согнули ее в виде незамкнутого кольца диаметром 7 *см*. Кольцо прикреплялось к куску эбонита. В центре кольца помещалась тонкая стеклянная трубочка OM, служащая осью металлической спицы LM, которая прижималась к поверхности кольца и могла перемещаться вдоль его окружности. «Детектор» состоял примерно из 30 очень тонких стальных проволочек диаметром 0,003 *дюйм*, вставленных в составной магнит длиной около 1 *см*. Проволочки были изолированы одна от другой шеллаком. Составленная таким образом игла была помещена в тонкую стеклянную трубочку, которую можно было быстро вставлять и вынимать из центральной трубочки OM.

По окружности кольца ABC были нанесены деления, и все это устройство закреплялось рядом с небольшим зеркальным магнитометром. Намагниченная игла «детектора» вставлялась в определенное место в стеклянную трубку, а отклонение магнитометра, вызванное иглой, компенсировалось дополнительным магнитом. Провода разрядного контура присоединялись к точкам C и M, и когда спица ML находилась в точке

C, на иглу не действовали никакие силы. Когда через кольцо проходил разряд, то магнитометр отклонялся, поскольку детектор частично размагничивался. Затем детектор быстро вынимался, намагничивался до насыщения в соленоиде, расположенном рядом, и вставлялся обратно. Если детектор намагничивался в очень сильном поле, то при вторичной установке его в трубке положение нуля не изменялось и для одинаковых разрядов получалось одинаковое отклонение магнитометра.

Поскольку магнитное поле в центре кольца при прохождении тока γ по дуге длиной l дается выражением

$$H = \frac{l\gamma}{r^2},$$

то мы видим, что магнитная сила, действующая на иглу, пропорциональна длине дуги, через которую проходит ток разряда.

Мы провели серию опытов и обнаружили, что в том случае, когда магнитная сила имеет величину, значительно меньшую той, что необходима для полного размагничивания стали, отклонение детектора приблизительно пропорционально магнитной силе, действующей на иглу.

Кривая на рис. 6 показывает соотношение между отклонением магнитометра и магнитной силой, действующей на иглу. Она представляет собой почти прямую линию, исключая верхнюю часть.

Чтобы определить затухание колебаний, мы пропускали разряд в одном направлении и отмечали отклонение магнитометра. Затем детектор вынимался, намагничивался и ставился обратно на место. Потом направление разряда изменялось и спица передвигалась по кольцу до тех пор, пока отклонение не достигало прежней величины. В этом случае отношение максимальных значений тока в первом и втором полупериодах равно отношению длин дуг, по которым проходит ток разряда.

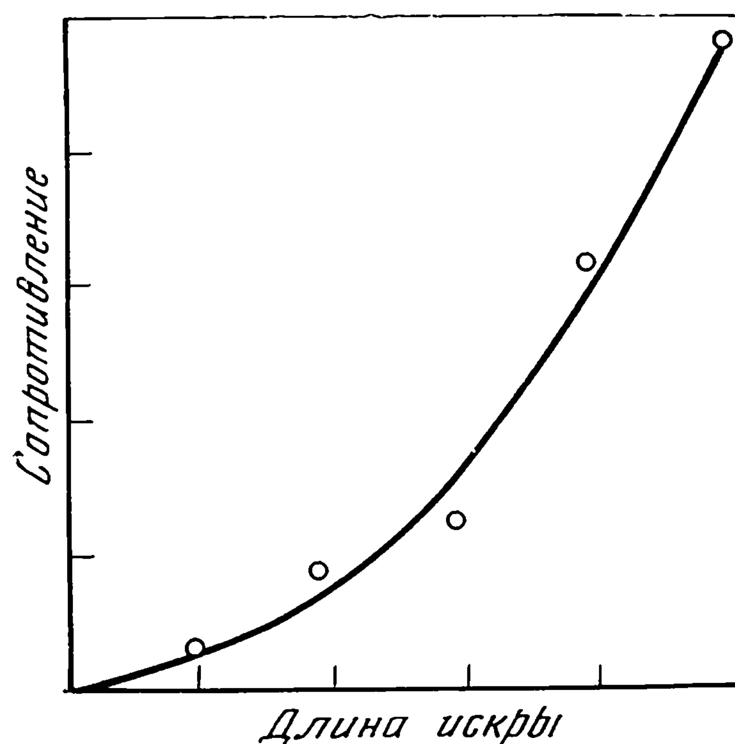


Рис. 6

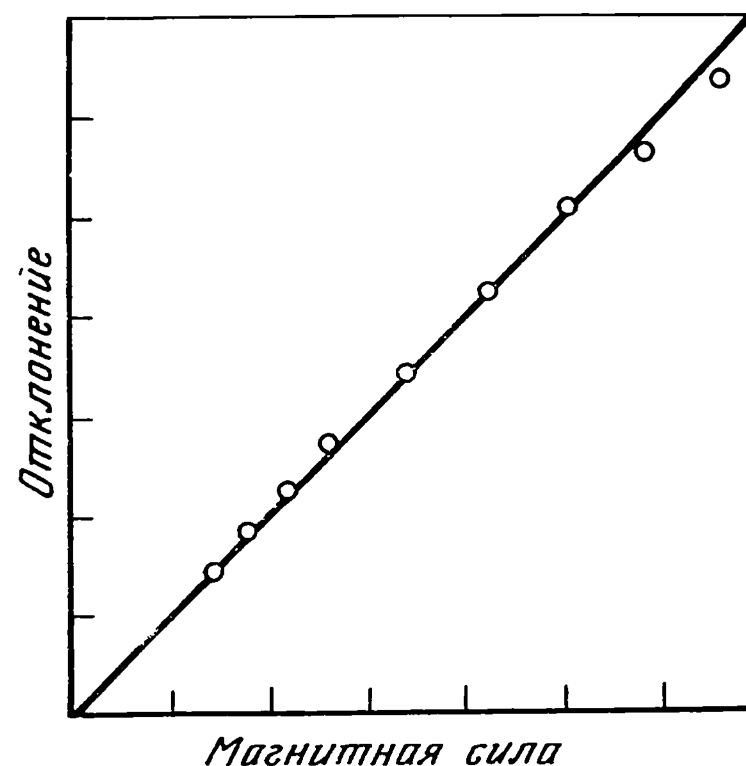


Рис. 7

Таким способом мы измеряли скорость затухания колебаний в обычных разрядных контурах. В цепях с короткими воздушными разрядниками и медными соединительными проводами определить затухание было очень трудно. Если увеличивать длину искрового промежутка, то поглощение энергии в воздушном разряднике приводит к сильному затуханию колебаний.

Если медные провода в цепи разряда заменить железными, то колебания очень быстро затухают во всех случаях, вне зависимости от длины искрового промежутка. Если в соленоид вставить железный цилиндр, то поглощение энергии в цилиндре приводит к быстрому затуханию колебаний, тогда как внесение медного цилиндра такого же диаметра никакого заметного эффекта не дает.

Опыт по определению затухания колебаний. Прямоугольный разрядный контур размером 184 *см* на 90 *см*; самоиндукция контура $L = 7400$; емкость $C = 2000$ *эл.-стат. ед.*; частота 1,25 млн. периодов в 1 *сек*:

Длина искрового промежутка, *см*	0,06	0,12	0,24	0,37	0,49	0,61
Отношение амплитуд двух первых полупериодов	0,98	0,97	0,93	0,9	0,79	0,7
Сопротивление, *см*	—	1,1	2,6	3,7	8,4	12,4

В нижней строке представлена рассчитанная величина эквивалентного сопротивления, соответствующего суммарным потерям энергии в подходящих проводах и искровом промежутке. Вычисленное сопротивление проводов разрядного контура составляет 0,4 *ом*, так что остальное сопротивление возникает за счет большого поглощения энергии в воздушном разряднике.

Представленная на рис. 7 кривая показывает соотношение между длиной искры и эквивалентным сопротивлением искры при разряде. Омическое сопротивление воздушного промежутка может в какой-то момент времени, вероятно, сильно изменяться в зависимости от величины заряда, однако поглощение энергии имеет совершенно определенную величину и может быть выражено через безындуктивное сопротивление, которое, если его вставить в эту цепь, поглотит то же количество энергии.

Следует заметить, что затухание колебаний быстро увеличивается с длиной искры, и с длиной искры также очень быстро возрастает сопротивление воздушного разрядника. Мы обнаружили также, что затухание зависит от емкости, если индуктивность и длина искры остаются неизменными. С увеличением емкости увеличиваются и затухание и сопротивление искры. Для примера приведем значения затухания и сопротивления воздушного разрядника длиной 0,32 *см*:

Емкость	1000	2000	4000
Отношение полупериодов	0,94	0,9	0,81
Сопротивление	2,2	2,6	3,8

Было обнаружено, что при небольшой емкости контура затухание очень мало. При замене медных проводов в контуре железными затухание при любой емкости оказалось велико. Когда емкость контура составляла лишь 130 *эл.-стат. ед.*, а индуктивность 2400, то при воздушном разряднике длиной 0,5 *см* заметного затухания не было обнаружено; когда же медные провода были заменены железными тех же размеров, амплитуда второго полупериода составляла только 0,6 амплитуды первого полупериода.

Сопротивление железных проводов при высокочастотных разрядах

Как уже отмечалось, при использовании железных проводов колебания в разрядном контуре быстро затухают. Это наблюдал еще Троубридж [2], который при фотографировании искры обнаружил, что замена медных проводов железными влечет за собой уменьшение числа колебаний.

Для очень быстрых колебаний сопротивление R' определяется выражением (см. [4])

$$R' = \sqrt{\frac{1}{2} p\mu l R},$$

где R — сопротивление провода постоянному току; l — длина провода; μ — проницаемость; $p = 2\pi n$ (n — число колебаний в секунду).

В это выражение входит μ, и можно ожидать, что сопротивление железных проводов будет гораздо больше сопротивления проводов с такой же проводимостью, но немагнитных.

Для определения сопротивления железных проводов использовался очень простой метод. Мы замечали, насколько уменьшается показание магнитометра при наличии иглы детектора, включенной по схеме, которая изображена на рис. 2. Затем мы заменяли железный провод медным того же диаметра. Так как при этом индуктивность цепи практически не изменялась, то при равенстве затухания в обоих контурах можно считать, что сопротивления обоих контуров равны. Затем в цепь с медными проводами был вставлен небольшой кусок проволоки из платинита, обладающего большим сопротивлением, и длина провода подбиралась таким образом, чтобы отклонение было таким же, как в первом случае. В этом случае сопротивление провода из платинита вместе с сопротивлением медного провода было равно сопротивлению железного провода на рабочей частоте.

Мы вычислили сопротивление медных проводов на рабочей частоте, которое, вообще говоря, было мало по сравнению с дополнительным сопротивлением. Было вычислено также сопротивление провода из платинита на рабочей частоте и оказалось, что оно остается практически тем же, что на постоянном токе. Длина провода в нашем контуре равнялась 265 *см*, длина искры 0,25 *см* (табл. 3).

Таблица 3

Тип материала провода	Диаметр, *см*	R	R_1	R_1/R
Мягкое железо	0,025	6,1	11,8	1,9
То же	0,047	2,62	12,8	4,9
»	0,094	0,57	9,2	16
»	0,295	0,051	4,2	82
Стальная фортепианная струна	0,062	1,51	11,3	6,5
Никелевый провод	0,062	0,66	3,7	5,9

В приведенной таблице R — сопротивление постоянному току, R_1 — сопротивление на частоте 1,6 млн. колебаний в секунду. В последнем столбце дано отношение R_1/R для различных проводов. Сопротивление провода диаметром 0,295 *см* на рабочей частоте в 82 раза больше сопротивления постоянному току, тогда как у провода диаметром 0,025 *см* это отношение равно всего 1,9.

Если вычислить μ, проницаемость образцов мягкого железа, по формуле

$$R' = \sqrt{\frac{1}{2} p\mu l R},$$

то обнаруживается, что эта величина зависит от диаметра провода:

Диаметр, *см*	0,025	0,042	0,094	0,295
μ	3,5	9,4	18	53

Кривая на рис. 8 показывает соотношение между диаметром провода и проницаемостью во время разряда в контуре. Видно, что μ изменяется приблизительно пропорционально радиусу провода.

Как и следовало ожидать, проницаемость тонких проводников очень мала, поскольку при пропускании через такие провода очень больших токов у поверхности железа действует большая магнитная сила.

Если считать затухание малым, то максимальный ток разряда определяется формулой $\gamma = pCV_0$, где C — емкость, а V_0 — потенциал, до которого заряжен конденсатор.

В описанном выше опыте воздушный разрядник был длиной около $^1/_{10}$ *дюйм*, разность потенциалов — около 10 000 *в*, а так как $p = 5 \cdot 10^6$, $C = 4000$, то максимальный ток был около 222 *а*.

Магнитная сила на поверхности провода радиуса r, по которому течет ток, определяется выражением

$$H = \frac{2\gamma}{r} = 3552 \text{ эл.-стат. ед., если } r = 0{,}0125 \text{ см.}$$

Если мы примем для B величину около 14 000, то видно, что для самого верхнего слоя проницаемость должна составлять около 4. Величина намагничивающей силы уменьшается в глубь от поверхности, и поэтому средняя проницаемость железа при разряде будет больше проницаемости поверхностного слоя. Это говорит о том, что проницаемость железа при таких разрядах — величина отнюдь не постоянная, а зависит от диаметра провода и силы разряда.

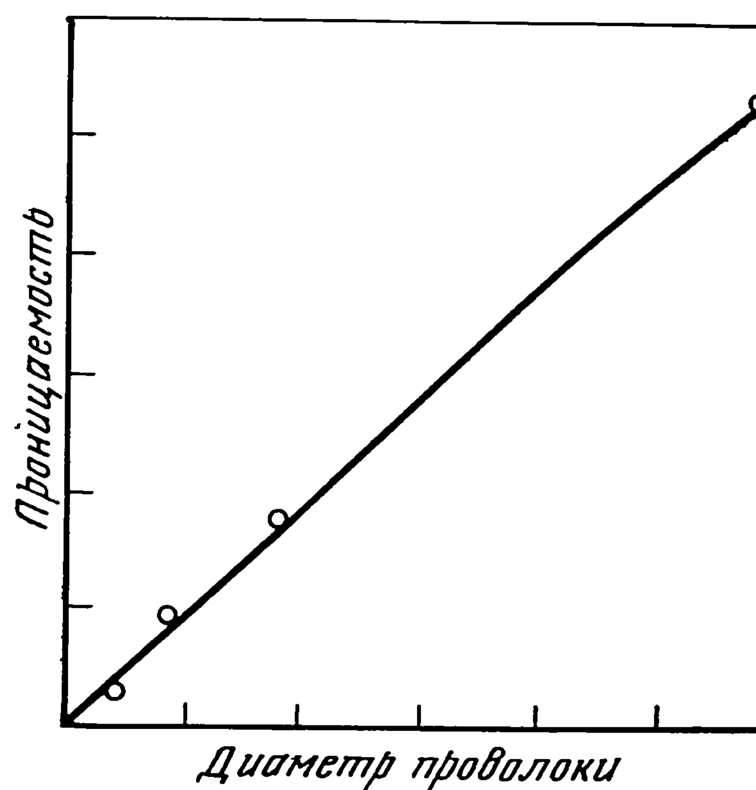


Рис. 8

Мы обнаружили, что сопротивление железных проводов зависит от длины искры. При использовании коротких воздушных разрядников сопротивление получается бо́льшим, чем с длинными разрядниками. Когда длина искры была отрегулирована так, что для различных периодов максимальный ток получался приблизительно одинаковым, сопротивление изменялось пропорционально квадратному корню из частоты, как и следовало ожидать из теории.

Чтобы выяснить, не увеличивается ли существенно сопротивление стали за счет больших потерь энергии при наличии гистерезиса, мы исследовали несколько образцов стальных фортепианных струн. Однако их сопротивление по сравнению с сопротивлением проводов из мягкого железа того же диаметра существенно не увеличилось, хотя для медленных колебаний потери вследствие гистерезиса стали намного больше, чем в мягком железе.

Поглощение энергии металлическими цилиндрами

Этот вопрос рассматривался теоретически и экспериментально Дж. Дж. Томсоном [5]. Опыты с безэлектродным разрядом показали, что железный цилиндр, помещенный в соленоид, поглощает существенно больше энергии, чем медный цилиндр таких же размеров. Метод, который мы здесь применяли, позволяет получить как количественные, так и качественные результаты.

Через соленоид длиной 14 *см*, намотка которого состояла примерно из 30 витков, разряжалась обычная лейденская банка. Затем в соленоид вкладывался металлический цилиндр и измерялось затухание колебаний. Потом цилиндр вынимался, а в контур включали такое безындуктивное сопротивление, чтобы получалось такое же затухание, как было с цилиндром в соленоиде. Тогда поглощение энергии в цилиндре было равно поглощению энергии в дополнительном сопротивлении, величина которого

известна. При этом мы не учитываем, что при установке металлического цилиндра в соленоид изменяется индуктивность контура. Это изменение мало и его можно сделать вообще незаметным, если работать с соленоидом, индуктивность которого существенно меньше индуктивности остальной части контура:

1. Измерительная трубка была заполнена тщательно прокатанной железной проволокой диаметром 0,008 *дюйм*. Чтобы исключить концевые токи, трубка заполнялась парафиновым маслом. В этом случае поглощение энергии соответствовало величине добавочного сопротивления 10,25 *ом*.

2. Измерительная трубка заполнялась стальными опилками, изолированными так же, как в опыте 1. Сопротивление возросло на 9 *ом*.

3. Тонкий цилиндр из мягкого железа диаметром 1,9 *см*. Сопротивление возросло на 3,9 *ом*.

4. Массивный железный стержень. Сопротивление возросло на 3,3 *ом*.

5. В опытах с медным цилиндром, измерительной трубкой, заполненной раствором сульфата меди, и платиновым цилиндром заметного поглощения энергии не было.

6. Угольный стержень поглощал большое количество энергии. Сопротивление возросло на 3,3 *ом*.

Частота колебаний в этих опытах составляла 2 млн. колебаний в секунду.

Если экспериментальные данные, полученные в опыте по измерению сопротивления с массивным железным цилиндром, сравнить с теоретическим значением [5], то для проницаемости получается значение, равное 172, что объясняет, почему железный цилиндр поглощает гораздо больше энергии, чем медный (табл. 4).

По характерному замирающему звуку от искры всегда можно было определить, много ли энергии поглощается в разрядном контуре. Если

Таблица 4

Поглощение энергии различными проводниками

Поглощение энергии выражено через увеличение сопротивления разрядного контура

Материал	Увеличение сопротивления, *ом*
Прокатанная проволока из мягкого железа	10,25
Массивный цилиндр из мягкого железа	3,5
Полый железный цилиндр	3,9
Угольный цилиндр	3,3
Медный, платиновый, цинковый цилиндры	Пренебрежимо мало
Стальные опилки	9

в разрядном контуре использовались медные провода, то искра была резкая и яркая; когда использовались железные провода, искра была слабая; когда медный цилиндр заменялся железным, искра становилась бледнее, а звук от нее менее разкий.

Определение периода колебаний разрядного контура

Если емкость конденсатора и величину самоиндукции разрядного контура нельзя вычислить непосредственно, то период колебаний контура часто очень трудно определить даже приблизительно.

Ниже приводится описание простой методики, которую можно использовать в весьма широком диапазоне частот.

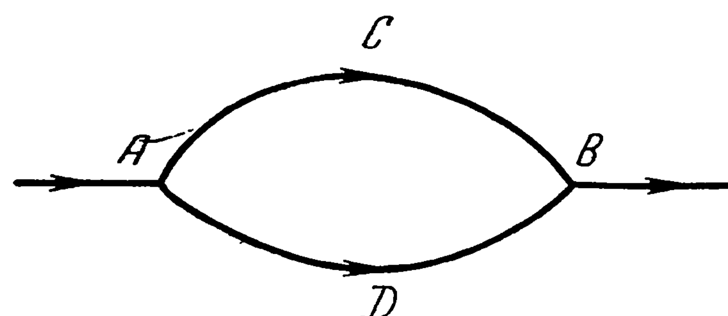


Рис. 9

Пусть ACB и ADB (рис. 9) — две ветви разрядного контура, соединенные параллельно; R и L — сопротивление и индуктивность ветви ACB; S и N — сопротивление и индуктивность ветви ADB; M — коэффициент взаимной индукции между этими двумя ветвями; x и y — токи в ветвях ACB и ADB.

Известно [5, стр. 513], что для быстропеременных токов частотой n, где $p = 2\pi n$, справедливы соотношения:

$$x = \left\{\frac{S^2 + (N - M)^2 p^2}{(L + N - 2M)^2 + (R + S)^2}\right\}^{1/2} \cos(pt + \varepsilon) = A \cos(pt + \varepsilon);$$

$$y = \left\{\frac{R^2 + (L - M)^2 p^2}{(L + N - 2M)^2 + (R + S)^2}\right\}^{1/2} \cos(pt + \varepsilon') = B \cos(pt + \varepsilon');$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{p\{R(N - M) - S(L - M)\}}{S(R + S) + (L + N - 2M)(N - M)p^2};$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon' = -\frac{p\{R(N - M) - S(L - M)\}}{R(R + S) + (L + N - 2M)(L - M)p^2};$$

A и B — максимальные токи в ветвях ACB и ADB соответственно;

$$\frac{A}{B} = \sqrt{\frac{S^2 + (N - M)^2 p^2}{R^2 + (L - M)^2 p^2}}.$$

Если цепь настроена так, что $A = B$, то

$$R^2 + (L - M)^2 p^2 = S^2 + (N - M)^2 p^2;$$

$$p^2 = \frac{R^2 - S^2}{N^2 - L^2 - 2M(N - L)}.$$

Величина импеданса $\sqrt{R^2 + p^2L^2}$ на высоких частотах в контуре с обычными медными проводами почти не зависит от R.

Пусть $n = 10^6$, $p = 2\pi \cdot 10^6$, $L = 10^4$, тогда

$$p^2L^2 = 4\pi^2 \cdot 10^{20}.$$

Если для этого периода величина R равна, например, 2 *ом*, то выражение

$$\frac{R^2}{p^2L^2} = \frac{1}{100\pi^2}$$

очень малая величина. Отсюда мы видим, что при обычных условиях сопротивлением по сравнению с индуктивностью можно пренебречь.

Если ветвь ACB такой раздвоенной цепи состоит из большого сопротивления, имеющего небольшую длину и соответственно малую индуктивность, а другая ветвь — из индуктивности N, и максимальные токи в этих двух ветвях равны, то

$$p^2 = \frac{R^2}{N^2 - L^2},$$

поскольку величиной S^2 можно пренебречь по сравнению с R^2, если предположить, что M мало по сравнению с N. Если индуктивность не изменяется, то величина $N^2 - L^2$ практически постоянная на всех частотах, и величина p, таким образом, пропорциональна R.

В нашем опыте в одну ветвь раздвоенной цепи была включена стандартная индуктивность N, а в другую — электролитическое сопротивление R. Изменяя величину R мы добивались равенства токов в обеих ветвях, что определялось по поведению иглы детектора. Когда влияние на иглу детектора было одинаковым в обеих цепях, максимальный ток имел одну и ту же величину, поскольку в каждой ветви возбуждались колебания с одинаковыми периодами.

Оказалось, что нет необходимости включать раздвоенную цепь последовательно с разрядным контуром, и все устройство работает эффективнее, если его подключить к PQ — части разрядного контура $XPQS$ (рис. 10), период которого нужно определить. Добавление такой шунтирующей цепи на период колебаний влияет слабо, поскольку эквивалентная индуктивность двух ветвей QP и $QBAP$ несколько меньше индуктивности отрезка QP, а длина QP в общем случае составляет менее $^1/_{10}$ от длины всего разрядного контура.

На рис. 10 ACB и ADB — ветви раздвоенной цепи, C — сопротивление из сульфата цинка с цинковыми электродами. Величину сопротивле-

ния можно изменять, варьируя длину электролита, через который проходит ток. Буквой D обозначена стандартная индуктивность, состоящая из шести витков изолированного провода, намотанного на бобину диаметром 10 *см*. Величину самоиндукции такой катушки можно рассчитать точно, и она была приблизительно одинаковой и для постоянного и для быстропеременного полей.

Если индуктивность L той ветви, где находится сопротивление, мала по сравнению с N, то значение p дается формулой $p = R/N$. Даже если

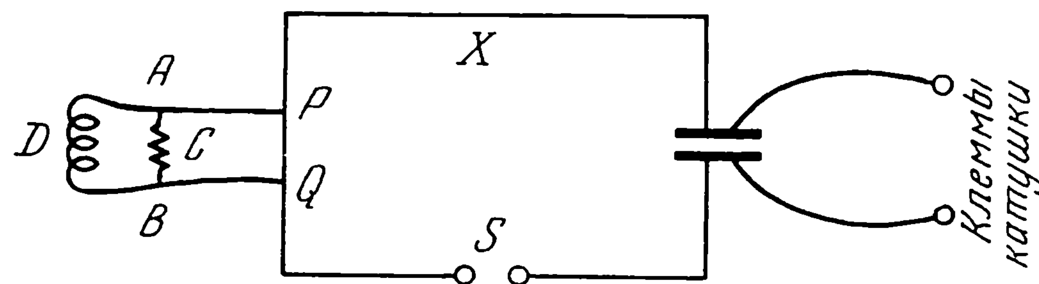


Рис. 10

$L = N/10$, поправка составляет только 1%. Сопротивление раствора сульфата цинка определялось по измерениям на постоянном токе, и можно показать, что при применяемых периодах колебаний изменение сопротивления, обусловленное концентрацией тока на поверхности, совершенно несущественно по сравнению с высоким удельным сопротивлением раствора.

Экспериментально это можно показать следующим образом: трубка, содержащая исследуемый раствор, помещается внутри соленоида, образованного несколькими витками провода, а внутрь раствора помещается игла детектора. После разряда обнаруживается, что ток действует на иглу одинаково — как с раствором, так и без него, что свидетельствует об отсутствии экранировки иглы в растворе. Поскольку закон спадания магнитной силы в глубь проводника и закон уменьшения амплитуды тока, протекающего через проводник, одинаковы, то отсюда следует, что амплитуда тока в центре раствора и на его поверхности одинакова, и никакого изменения сопротивления электролита из-за концентрации тока на поверхности не происходит.

Мы разряжали воздушный конденсатор емкости C, величина которой определялась расчетным путем, через цепь, индуктивность L которой для высоких частот можно было определить очень приблизительно.

Значение $p = 1/\sqrt{LC}$, которое получалось из теории, совпадало с экспериментальными данными с точностью 3 %, и, вероятно, экспериментальные данные ближе к действительному значению, поскольку точно вычислить величину индуктивности трудно. Так как теоретические и экспериментальные данные хорошо совпадают, то тем самым мы косвенно показали, что сопротивление такого электролита как сульфат цинка одинаково как на высоких, так и на низких частотах.

В качестве примера возьмем значение стандартной индуктивности N, равное 6500, и определим период колебаний. Ток в обеих цепях будет одинаковым при величине сопротивления R, равном 168 *ом*. Отсюда

$$p = \frac{R}{N} = \frac{168 \cdot 10^9}{6500} = 2{,}6 \cdot 10^7.$$

Частота $n = p/2\pi = 4{,}1 \cdot 10^6$.

Можно также вычислить величину емкости и индуктивности для высоких частот разрядного контура. Если заменить лейденскую банку неизвестной емкости C' воздушным конденсатором известной емкости C', то величина L не изменится. Останется прежней и величина сопротивления, необходимая для равенства токов в обеих ветвях. Тогда, если вместо p' и R' будут новые значения p и R

$$p = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \qquad p' = \frac{1}{\sqrt{LC'}},$$

$$R = pN, \qquad R' = p'N,$$

то

$$\frac{C}{C'} = \frac{p'^2}{p^2} = \frac{R'^2}{R^2}.$$

Поскольку обе величины R и R' определены, то C можно выразить через стандартную емкость C'.

Аналогичным образом можно найти величину L — самоиндукцию на высоких частотах. Если в цепь ввести дополнительную стандартную индуктивность L', то величина емкости не изменится и

$$p = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad p' = \frac{1}{\sqrt{(L + L')\,C}},$$

откуда

$$\frac{L + L'}{L} = \frac{p^2}{p'^2} = \frac{R^2}{R'^2}.$$

Таким образом, величина L на высоких частотах выражается через известную индуктивность L'.

В опытах по определению периода колебаний использовался детектор, состоящий из 20 и более изолированных стальных проволочек с намотанными на них одним или двумя витками провода, по которому проходил переменный ток. Эта маленькая катушка детектора помещалась рядом с магнитометром и ее можно было подключить то к индуктивной ветви, то к ветви, в которой стояло сопротивление.

Индуктивность катушки детектора была очень небольшой и она мало изменяла распределение тока в этих цепях. Таким способом можно было легко сравнить величины токов в этих двух ветвях.

Для грубых измерений можно использовать также «продольный» детектор, однако он не столь чувствителен к небольшим изменениям тока, как соленоидальный детектор из тонкой проволоки.

Мы обнаружили, что индуктивность почти не изменяется, если железный провод заменить медным такого же диаметра. Точно определить изменение индуктивности в этом случае трудно, поскольку в контуре с железным проводом колебания быстро затухают.

Поскольку мы могли определить емкость конденсаторов на высоких частотах, нам было интересно узнать, различается ли удельная наведенная емкость стекла в медленно и быстро изменяющихся полях. Некоторые исследователи обнаружили, что стекло при быстрых колебаниях имеет гораздо меньшую удельную наведенную емкость, чем при медленных, тогда как другие исследователи получали приблизительно одинаковые результаты в обоих случаях. Мы нашли, что удельная наведенная емкость зеркального стекла равна приблизительно 6,5 при частоте около 3 млн. периодов в секунду. Это существенно больше значения, полученного Дж. Дж. Томсоном и Блондло, которые определили, что при частоте около 20 млн. периодов в секунду эта величина равна соответственно 2,7 и 2,3.

Мы определили, что удельная наведенная емкость эбонита, измеренная таким же методом, имеет ту же величину, что и при медленных колебаниях.

Кавендишская лаборатория.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rayleigh R.* Phil. Mag., 1870, 39, 429.
2. *Trowbridge J.* Phil. Mag., 1891.
3. *Bjerknes.* Electrician, 1892.
4. *Rayleigh R.* On the Self-induction and Resistance of Straight Conductors. Phil. Mag., 1886.
5. *Thomson J. J.* Recent Researches. Phil. Mag., 1891, 321—326.

1899

3

ИЗЛУЧЕНИЕ УРАНА И ВЫЗЫВАЕМАЯ ИМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ *

Удивительное излучение, испускаемое ураном и его соединениями, изучалось его первооткрывателем Беккерелем, и результаты исследований природы и свойств этого излучения представлены серией статей в журнале Comptes Rendus [1, 2]. Он показал, что излучение, непрерывно испускаемое соединениями урана, обладает способностью проходить через металл достаточной толщины и другие непрозрачные вещества; оно может действовать на фотографическую пластинку и разряжать в равной степени как положительно, так и отрицательно заряженные тела. Газ, через который проходит излучение, временно становится проводником электричества и сохраняет способность разряжать наэлектризованные тела в течение небольшого промежутка времени после того, как источник излучения удален.

Результаты опытов Беккереля показывают, что лучи Рентгена и излучение урана очень схожи по способности проникать через твердые тела и вызывать проводимость в газе, через который они проходят; однако между этими двумя типами излучения имеется существенное различие. Беккерель обнаружил, что излучение урана можно преломлять и поляризовать, в то время как для излучения Рентгена никаких определенных результатов по поляризации и преломлению получено не было.

Задача настоящей работы состояла в более детальном исследовании природы излучения урана и вызванной им электропроводности. Большинство полученных результатов сравнивается с выводами теории ионизации газов, которая используется для объяснения электропроводности, вызванной лучами Рентгена, поэтому приводится краткий обзор этой теории и результатов, к которым она приводит.

В ходе исследования рассматривались следующие вопросы:

§ 1. Сравнение методов исследования
§ 2. Поляризация и преломление
§ 3. Теория ионизации
§ 4. Сложный состав излучения урана
§ 5. Излучение, испускаемое различными соединениями урана
§ 6. Степень прозрачности веществ для двух типов излучения

---

* Philosophical Magazine, January, 1899, ser. 5, 47, 109—163.

§ 7. Излучение тория
§ 8. Поглощение излучения урана в газах
§ 9. Зависимость поглощения от давления
§ 10. Влияние давления на скорость разряда
§ 11. Степень ионизации различных газов
§ 12. Зависимость тока между двумя пластинами от расстояния между ними
§ 13. Скорость рекомбинации ионов
§ 14. Скорость ионов
§ 15. Градиент потенциала между двумя пластинами
§ 16. Соотношение между током и э.д.с.
§ 17. Разделение положительных и отрицательных ионов
§ 18. Разрядные свойства тонких сеток
§ 19. Общие замечания

§ 1. Сравнение методов исследования

Свойства излучения урана могут быть исследованы двумя методами: по воздействию излучения на фотографическую пластинку и по разряду наэлектризованного тела. Фотографический метод очень медленный и трудоемкий и к тому же годен только для грубых измерений. Чтобы заметить какое-либо воздействие излучения на фотопластинку, требуется экспозиция в два-три дня. Кроме того, когда мы имеем дело с очень слабым изображением на фотопластинке, то при большом времени экспозиции результаты могут сильно исказиться под влиянием паров различных веществ [3]. С другой стороны, метод, основанный на измерении разряда наэлектризованных тел, вызванного излучением, гораздо быстрее фотографического метода, да к тому же позволяет проводить очень точные количественные измерения.

Но поляризация и преломление могут исследоваться только фотографическим методом. Удовлетворительным образом измерить поляризацию с помощью электрического метода не представляется возможным (это объяснено в § 2).

§ 2. Поляризация и преломление

Почти одинаковые эффекты, вызываемые в газах излучением урана и лучами Рентгена (это описано далее), привели меня к мысли сравнить экспериментально, как ведут себя эти два типа излучения и в других отношениях.

Чтобы проверить это, были проведены опыты, в которых исследовались поляризация и преломление излучения урана. Беккерель [1, стр. 559] заметил и поляризацию и преломление, а я в проведенных аналогичных опытах не смог обнаружить ни того, ни другого. В этих опытах, проведенных в различных условиях, я облучил большое количество фотопластинок, но ни на одной из них не обнаружил эффекта, свидетельствующего о наличии поляризации или преломления.

Чтобы при большой экспозиции, которая требовалась для этих опытов, пластинки не засвечивались под влиянием паров различных веществ, мы

применяли, где это было возможно, свинец, поскольку он мало влияет на пластинки.

Ниже приводится краткая сводка результатов исследования преломления и поляризации.

Преломление. Вдоль толстой свинцовой пластинки была прорезана длинная узкая щель; пластинка помещалась над однородным слоем окиси урана; все устройство эквивалентно линейному источнику излучения со щелью. Затем на свинцовую пластинку ставились в один ряд призмы из стекла, алюминия и парафина таким образом, чтобы одна из граней каждой призмы покрывала щель. На расстоянии 5 *мм* от щели располагалась фотопластинка, помещенная в светонепроницаемую коробку. В таком положении пластинка оставалась в течение недели. После проявления на пластинке наблюдалась темная линия. Заметного сдвига или уширения этой линии в местах, где располагались призмы, мы не заметили. Различные размеры щелей дали тоже отрицательные результаты. Если бы существовало сколько-нибудь заметное преломление, то изображение щели должно было бы сдвинуться относительно ее действительного положения.

Беккерель [1] исследовал прозрачность сплошного и мелко раздробленного стекла для уранового излучения, измеряя электрический разряд наэлектризованных тел, и обнаружил, что раздробленное стекло, во всяком случае, прозрачнее сплошного. Я повторил этот опыт и получил тот же результат. Как утверждал Беккерель, этот результат трудно увязать с наличием преломления.

Поляризация. Опыт ставился почти так же, как и в работе Беккереля. В толстой свинцовой пластинке было прорезано глубокое отверстие, частично заполненное окисью урана. Отверстие закрывалось небольшой пластинкой турмалина. Другая пластинка турмалина была разрезана пополам, и обе ее половины были помещены на первую пластинку таким образом, что на одной половине отверстия пластинки имели скрещенную поляризацию, а на другой половине — одинаковую. Турмалин был оптически хорошо прозрачен. Над пластинками турмалина на расстоянии 1—3 *мм* располагалась фотопластинка. Пластинка экспонировалась в течение четырех дней и после проявления на ней наблюдался темный круг, но ни на одной из фотопластинок не было обнаружено различия в интенсивности обеих половин. Беккерель [1] утверждал, что в его опыте половины были затемнены неодинаково, и отсюда он заключил, что для излучения урана турмалин обладает двоякопреломляющими свойствами и что каждый из лучей поглощается по-разному.

§ 3. Теория ионизации

Чтобы объяснить появление проводимости газа под действием лучей Рентгена, была выдвинута теория [4], что эти лучи при прохождении через газ образуют в нем положительно и отрицательно заряженные ча-

стицы и число частиц, образовавшихся за секунду, зависит от интенсивности излучения и давления.

Предполагается, что эти носители так малы, что под действием постоянного градиента потенциала они движутся через газ с постоянной скоростью. По аналогии с проводимостью электролитов эти носители были названы ионами, но при использовании этого термина в данном случае не предполагается, что ион обязательно должен иметь атомные размеры, он может быть и многоатомным.

Предположим, что пространство между двумя пластинами заполнено газом, который подвергается облучению, а между пластинами поддерживается постоянная разность потенциалов. Под действием излучения в каждую секунду будет образовываться некоторое количество ионов, и их число, вообще говоря, будет зависеть от давления газа. Под влиянием электрического поля положительные ионы движутся к отрицательной пластине, а отрицательные ионы — к положительной и, следовательно, через газ пойдет ток. Некоторые ионы будут рекомбинировать, причем скорость рекомбинации будет пропорциональна квадрату числа ионов. Ток, проходящий через газ при данной интенсивности излучения, будет зависеть от разности потенциалов между пластинами, но при разности потенциалов, превышающей определенное значение, ток будет стремиться к некоторому максимуму. Это означает, что все ионы вытягиваются электрическим полем прежде, чем смогут рекомбинировать.

Положительные и отрицательные ионы частично разделяются электрическим полем. Часть ионов одного знака можно удалить и получить таким образом заряженный газ. Если ионы распределены между пластинами неоднородно, то движение ионов будет влиять на распределение градиента потенциала.

Если при образовании ионов поглощается энергия, то следует ожидать, что поглощение пропорционально числу образованных ионов и, таким образом, зависит от давления. Если применить эту теорию к излучению урана, то мы должны получить следующие результаты:

1. В объеме газа образуются заряженные носители.
2. Ионизация пропорциональна интенсивности излучения и давлению.
3. Поглощение излучения пропорционально давлению.
4. Существует ток насыщения.
5. Скорость рекомбинации пропорциональна квадрату числа ионов.
6. Положительные и отрицательные ионы частично разделяются.
7. При определенных условиях излучение изменяет распределение градиента потенциала между двумя пластинами.

Результаты описанных здесь опытов достаточно хорошо показывают, что эта теория дает удовлетворительное объяснение электрической проводимости, вызванной излучением урана.

Во всех опытах, которые описаны ниже, результаты не зависят от знака заряда пластины, если противоположное утверждение не высказано особо.

§ 4. Сложный состав излучения урана

Прежде чем переходить к общему рассмотрению проводимости, вызванной излучением урана, дадим сводку результатов некоторых опытов, которые ставились с целью выяснить, одинаковое ли излучение испускают уран и его соединения и также однородно ли это излучение по составу. Рентген и другие исследователи заметили, что X-лучи, вообще говоря, имеют сложный состав. Они состоят из различных лучей, отличающихся по способности проходить через твердые тела. Их проникающая способность существенно зависела также от степени откачки трубки Крукса.

Для определения состава излучения мы использовали электрический метод. Общая схема установки показана на рис. 1.

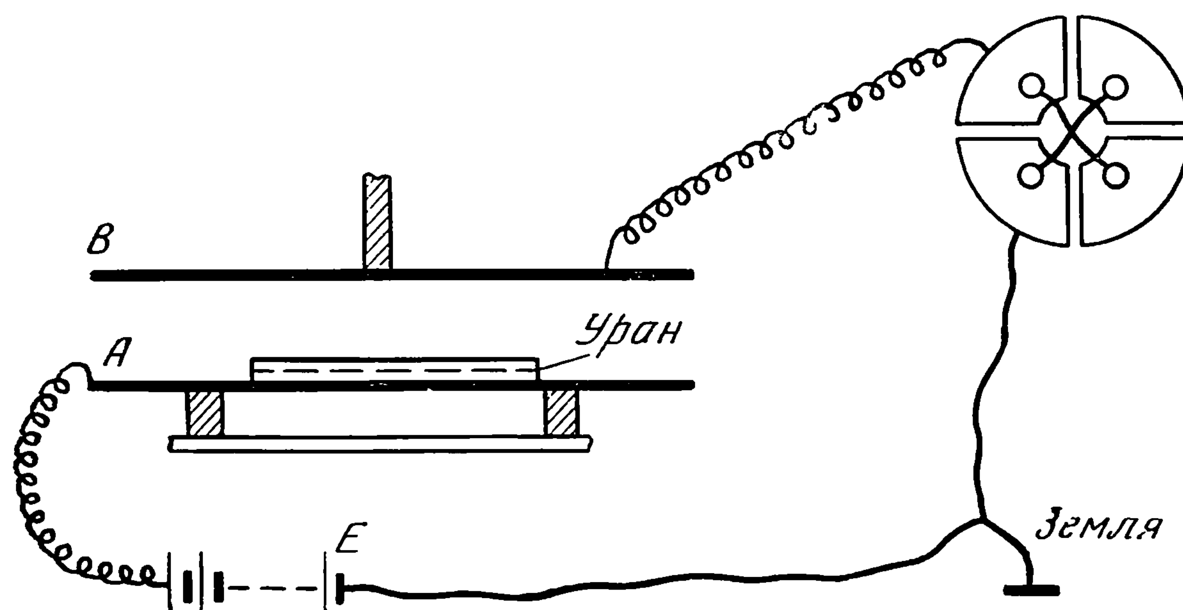


Рис. 1

Металлический уран или соединения урана, которые мы исследовали, были смолоты в порошок и равномерно насыпаны на центральную часть горизонтально расположенной цинковой пластины *A* площадью 20 *см*^{2}. Параллельно этой пластине на расстоянии 4 *см* была расположена пластина *B*, площадью также 20 *см*^{2}. Обе пластины были изолированы. Пластина *A* соединялась с одним полюсом батареи напряжением 50 *в*, а другой полюс батареи был заземлен; пластина *B* соединялась с одной парой квадрантов электрометра, другая пара которого также заземлялась.

Под влиянием излучения урана между пластинами *A* и *B* возникает ток разряда. Скорость движения стрелки электрометра, когда это движение установилось, принималось за меру тока через газ.

Затем поверхность соединения урана накрывалась листками тонкой металлической фольги и измерялась скорость разряда при различном числе листков. В табл. 1 представлены результаты, полученные в опытах с тонкой фольгой из сплава меди с цинком (толщина металлического листка 0,00008 *см*, на пластине слой окиси урана).

Относительное изменение скорости разряда приведено при последовательном добавлении листков фольги. Если добавлялось сразу два листка, то из полученного отношения извлекался квадратный корень, а если

Таблица 1

Число слоев	Скорость разряда в 1 *мин*, деления шкалы	Относительное изменение скорости разряда	Число слоев	Скорость разряда в 1 *мин*, деления шкалы	Относительное изменение скорости разряда
0	91	0,85	5	33	0,75
1	77	0,78	6	24,7	0,79
2	60	0,82	8	15,4	0,77
3	49	0,86	10	9,1	0,86
4	42	0,79	13	5,8	

добавлялись три листка — то кубический. Из таблицы видно, что для первых десяти листков металла скорость разряда уменьшается приблизительно в геометрической прогрессии, тогда как толщина металла возрастает в арифметической прогрессии.

Мы покажем (в § 8), что скорость разряда между двумя пластинами при напряжении насыщения пропорциональна интенсивности излучения после прохождения его через металл. Приложенное напряжение, равное 50 *в*, оказалось недостаточным для получения тока насыщения, но мы заметили, что в одних и тех же условиях относительная скорость разряда при напряжениях 50 и 200 *в* получалась почти одинаковой. Если измеряется очень малая скорость разряда, то для того чтобы небольшие изменения напряжения батареи не влияли существенно на результаты, желательно использовать возможно меньшее напряжение. По этой причине мы использовали напряжение 50 *в*, однако относительная скорость разряда получилась приблизительно такой же, как при напряжении, соответствующем насыщению.

Поскольку скорость разряда при увеличении толщины металла уменьшается в геометрической прогрессии, то из изложенного следует, что интенсивность излучения падает в геометрической прогрессии, т. е. в соответствии с обычным законом поглощения. Это показывает, что рассматриваемая часть излучения практически однородна по составу.

При увеличении числа слоев поглощение начинает уменьшаться. Более отчетливо это видно в опытах с окисью урана при использовании тонких алюминиевых фольг — 0,0005 *см* (табл. 2).

Мы обнаружили, что для первых трех листков алюминиевой фольги интенсивность излучения падает в соответствии с обычным законом поглощения, а при добавлении еще восьми листков интенсивность излучения уменьшается слабо.

В этом случае алюминиевая фольга имела толщину около 0,0005 *см* и после того, как излучение прошло через 0,002 *см* алюминия, его интенсивность упала приблизительно до $^1/_{20}$ первоначального значения. При добавлении еще одного слоя алюминия толщиной 0,001 *см* скорость разря-

Таблица 2

Число слоев алюминиевой фольги	Скорость разряда в 1 *мин*, деления шкалы	Отношение	Число слоев алюминиевой фольги	Скорость разряда в 1 *мин*, деления шкалы	Отношение
0	182		3	14,6	
1	77	0,42	4	9,4	0,65
2	33	0,43	12	7	
		0,44			

да уменьшилась незначительно. Однако после прохождения еще 0,05 *см* алюминия, что соответствует сотне листков фольги, интенсивность излучения уменьшилась еще приблизительно в 2 раза.

Эти опыты показывают, что излучение урана неоднородно по составу — в нем присутствуют по крайней мере два излучения различного типа. Одно очень сильно поглощается, назовем его для удобства α-излучением, а другое имеет бо́льшую проникающую способность, назовем его β-излучением.

Свойства β-излучения, по-видимому, не зависят от материала фильтра, через который оно проходит. Обнаружено, что излучение получается одинаковой интенсивности и проникающей способности независимо от того, чем поглощается α-излучение — тонкими листками алюминия, олова или бумаги; β-излучение проходит через все исследованные материалы гораздо легче, чем α-излучение. Так, если уран накрыть пластинкой тонкого покровного стекла, то скорость разряда уменьшается в 30 раз; однако β-излучение проходит через это стекло с едва заметной потерей интенсивности.

Из результатов некоторых опытов с алюминием различной толщины можно, по-видимому, заключить, что β-излучение почти однородно по составу. Ниже приведены некоторые результаты, полученные для β-излучения окиси урана:

Толщина алюминия	0,005	0,028	0,051	0,09
Скорость разряда	1	0,68	0,48	0,25

За единицу принималась скорость разряда, когда α-излучение полностью поглотилось десятью слоями алюминиевой фольги. Интенсивность излучения уменьшается при увеличении толщины металла, через который оно проходит, в соответствии с обычным законом поглощения. Напомним, что при наличии только β-излучения скорость разряда составляет, вообще говоря, только несколько процентов от скорости разряда при α-излучении, и нужно учитывать, что исследование состава β-излучения не может проводиться с той же точностью, что в случае α-излучения.

Проведенные опыты позволяют, однако, заключить, что β-излучение, по-видимому, почти однородно, хотя возможно, что в нем присутствуют и другие типы излучения либо малой интенсивности, либо очень большой проникающей способности.

§ 5. Излучение, испускаемое различными соединениями урана

Все исследованные соединения урана испускали излучение двух типов, и проникающие способности как α-, так и β-излучения всех соединений совпадали.

В табл. 3 приведены результаты, полученные для некоторых соединений урана (толщина алюминиевой фольги 0,0005 *см*).

Таблица 3

Число слоев алюминиевой фольги	Относительная скорость разряда			
	Металлический уран	Нитрат урана	Окись урана	Сульфат уран-калия
0	1	1	1	1
1	0,51	0,43	0,42	0,42
2	0,35	0,28	0,18	0,27
3	—	0,17	0,08	0,17
4	—	0,15	0,05	0,12
5	0,15	—	—	—
12	—	0,125	0,04	0,11

На рис. 2 графически представлены некоторые результаты, полученные для различных соединений урана. По оси ординат отложена скорость разряда, а по оси абсцисс — толщина алюминиевой фольги, через которую проходило излучение.

Различные соединения урана вызывают разную скорость разряда, и для удобства сравнения за единицу принята скорость разряда от образца соли, не покрытого фольгой.

Мы видим, что первый слой металла уменьшает скорость разряда приблизительно в одинаковой степени во всех опытах, а после наложения четырех слоев фольги спад интенсивности в значительной степени замедляется.

Скорость разряда от β-излучения по отношению к скорости разряда от всего излучения в каждом случае принимает различные значения. Мы использовали металлический уран в виде порошка, а поверхность, на которую он наносился, была меньше, чем в опытах с другими соединениями. В опытах с окисью урана мы работали с тонким слоем мелкого порошка и убедились, что в этом случае β-излучение составляет гораздо меньшую

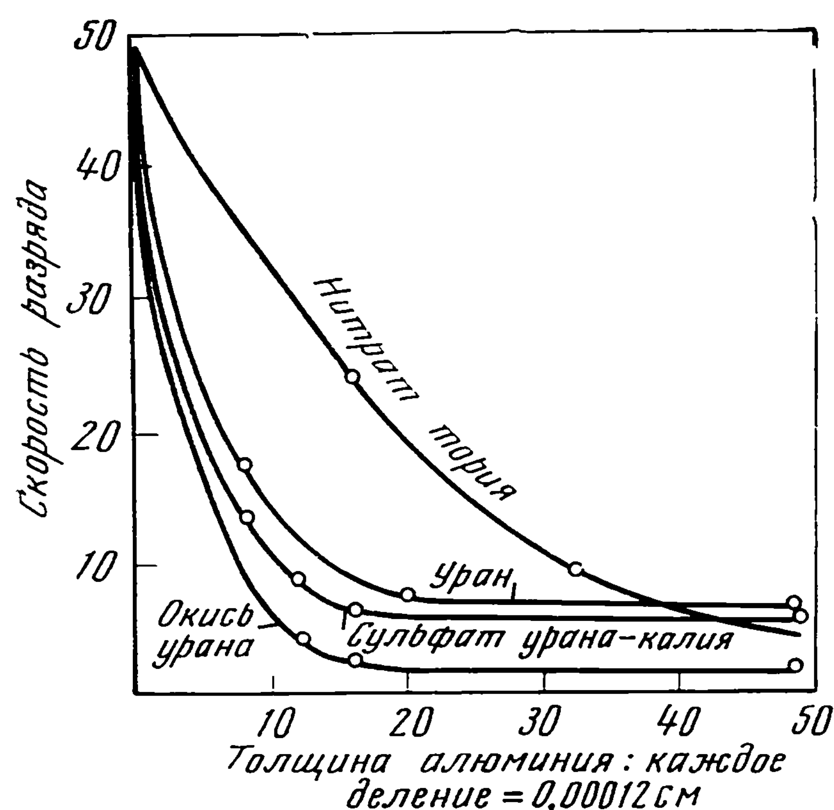


Рис. 2

долю общего излучения, чем в опытах с другими соединениями. Однако, как видно из табл. 4, при работе с толстым слоем окиси урана относительная величина β-излучения возрастала.

Интенсивность α-излучения зависит главным образом от размеров поверхности соединения урана, тогда как β-излучение зависит также от толщины слоя. Увеличение скорости разряда от β-излучения при увеличении толщины слоя показывает, что β-излучение может проходить через значительную толщу соединений урана. Опыты показали, что разряд от α-излучения при увеличении толщины слоя существенно не возрастает. К сожалению, из-за отсутствия достаточного количества соли урана я не смог проверить, как влияет толщина слоя на скорость разряда от β-излучения при толстых слоях.

Скорость разряда при данном весе урана или его соединения зависит в основном от размера поверхности. Чем больше поверхность, тем больше скорость разряда. Мы растворили небольшой кристалл нитрата урана в воде, затем испарили воду и на дне блюдца получили тонкий слой соли. Такой образец давал достаточно большую скорость разряда, и в этом случае разряд вызывался главным образом α-излучением.

Поскольку скорость разряда при работе с любым соединением урана зависит в основном от размера поверхности, то количественно трудно сравнивать излучение различных соединений даже одинакового веса, поскольку результат будет зависеть главным образом от пористости образца. Возможно, что обнаруженное Кюри [5] очень сильное излучение урановой смолки обусловлено частично скорее очень тонкой структурой соединения, нежели тем, что образец содержит новое, сильно излучающее вещество.

Таблица 4

Число слоев алюминиевой фольги	Скорость разряда		Число слоев алюминиевой фольги	Скорость разряда	
	Тонкий слой окиси урана	Толстый слой окиси урана		Тонкий слой окиси урана	Толстый слой окиси урана
0	1	1	8	—	0,113
1	0,42	5	12	0,04	—
2	0,18	—	18	—	0,11
4	0,05	0,12			

Скорость разряда от β-излучения, как правило, гораздо меньше скорости разряда от α-излучения. Однако сравнивать интенсивности этих двух типов излучения трудно; α-излучение сильно поглощается в газах (см. § 8), а β-излучение поглощается в них слабо. Далее будет показано (см. § 8), что поглощение излучения в газе приблизительно пропорционально числу образованных ионов. Таким образом, если β-излучение слабо поглощается в газе, то число ионов, образуемых этим излучением, мало, т. е. скорость разряда мала. Относительная скорость разряда от α- и β-излучений зависит, таким образом, и от относительного поглощения излучения в газе, и от относительной его интенсивности.

Можно сравнить α- и β-излучения также по их воздействию на фотопластинку. Путем разбрызгивания мы наносили на стеклянную пластинку тонкий однородный слой окиси урана; одна половина пластинки покрывалась алюминием такой толщины, чтобы α-излучение практически полностью поглощалось. Над поверхностью урана на расстоянии 4 *мм* помещалась фотопластинка. Экспонирование продолжалось 48 *час*, и после проявления оказалось, что обе половинки пластинки почернели приблизительно одинаково. На одну половину пластинки действовало только β-излучение, а на другую половину α- и β-излучения вместе. Если фотопластинку располагали не очень близко к поверхности урана, то на нее воздействовало в основном β-излучение.

§ 6. Степень прозрачности веществ для двух типов излучения

Если интенсивность излучения при прохождении через вещество изменяется согласно обычному закону поглощения, то отношение r интенсивности излучения после прохождения через вещество толщиной d к интенсивности излучения без вещества дается формулой

$$r = e^{-\lambda d},$$

где λ — коэффициент поглощения; $e = 2{,}7$.

В табл. 5 приведены значения λ для α- и β-излучений, причем предполагается, что каждое из этих излучений однородно по составу и его интенсивность спадает по приведенному выше закону.

Полученные результаты показывают, что эти два типа излучения очень сильно различаются по проникающей способности. Алюминий более чем в 100 раз прозрачнее для β-излучения, чем для α-излучения. По мере увеличения атомного веса металлов — алюминия, меди, серебра и платины прозрачность их для β-излучения уменьшается. Алюминий — наиболее прозрачный из всех исследованных металлов, однако стекло еще прозрачнее для β-излучения, чем алюминий. Платина задерживает излучение в 16 раз сильнее, чем алюминий. Для α-излучения алюминий прозрачнее, чем сплав меди с цинком и оловянная фольга.

Таблица 5

Вещество	λ для α-излучения	λ для β-излучения	Вещество	λ для α-излучения	λ для β-излучения
Сплав меди с цинком	2700	—	Медь	—	49
Алюминий	1600	15	Серебро	—	97
Оловянная фольга	2650	108	Платина	—	240
			Стекло	—	5,6

Алюминий толщиной 0,09 *см* уменьшает интенсивность β-излучения в 4 раза; медь толщиной 0,03 *см* уменьшает интенсивность излучения в 4,3 раза. Эти результаты не согласуются с некоторыми данными Беккереля [1], который нашел, что медь для излучения урана прозрачнее, чем алюминий.

По порядку величины β-излучение имеет такую же проникающую способность, как и излучение от обычной трубки Крукса. Его проникающая способность, однако, намного меньше, чем у лучей от «жесткой» трубки. С другой стороны, α-излучение поглощается гораздо сильнее, чем X-лучи от обычной трубки, и по своей проникающей способности напоминает вторичное излучение, возникающее при падении X-лучей на поверхность металла [6, 7].

Возможно, что α-излучение представляет собой вторичное излучение, возникающее вблизи поверхности урана при прохождении через уран β-излучения, подобно тому, как при прохождении через металл лучей Рентгена вблизи поверхности металла возникает диффузное излучение. Однако сейчас мы не имеем достаточного количества опытных данных для решения этого вопроса.

§ 7. Излучение тория

Когда проводились опыты по изучению состава излучения урана, было сделано открытие [8], что торий и его соли также испускают лучи, свойства которых во многом подобны свойствам излучения урана. Мы провели некоторые опыты для сравнения излучений урана и тория.

Исследовались нитрат и сульфат тория, с которыми были получены сходные результаты, хотя оказалось, что нитрат активнее сульфата. Скорость разряда в опытах с этими солями была того же порядка, что и с соединениями урана; однако сколько-нибудь удовлетворительного количественного сравнения излучений урановых и ториевых солей сделать

нельзя, поскольку скорость разряда зависит от толщины слоя и величины поверхности.

Мы обнаружили, что когда измерения с нитратом тория, нанесенным на платиновую пластинку, проводились на воздухе, то сначала он давал неустойчивое излучение; скорость разряда изменялась самым нерегулярным образом, иногда больше чем в 5 раз. Эта соль была сильно гигроскопична, но после нескольких часов пребывания на воздухе скорость разряда стала устойчивее и можно было провести грубые измерения. Сульфат тория был более стабильным, чем нитрат.

Поглощение излучения тория исследовалось таким же способом, как поглощение излучения урана. Ниже приведены некоторые результаты. Мы применяли алюминиевую фольгу такой же толщины (0,0005 *см*), как и в опытах с ураном.

Число слоев	0	4	8	12	17
Скорость разряда в 1 *мин*, деления шкалы	200	94	37	19	7,5

Кривая, показывающая соотношение между скоростью разряда и толщиной металла, через который проходило излучение, приведена на рис. 2, где показаны также результаты опытов с ураном.

Видно, что по проникающей способности излучение тория отличается от α-излучения урана. Излучение тория проходит через 3—4 слоя алюминиевой фольги, прежде чем его интенсивность упадет наполовину, тогда как интенсивность излучения урана уменьшается почти в 2 раза после прохождения через один слой фольги.

В опытах с толстыми слоями тория мы обнаружили, что его излучение неоднородно по составу, в нем присутствуют какие-то лучи большой проникающей способности. Но вследствие непостоянства излучения нитрата тория никаких точных опытов по изучению этого явления не проводилось.

Таким образом, как излучение тория, так и излучение урана имеют сложный состав, и если принимать во внимание только α-излучение, то они различаются по проникающей способности.

Во всех опытах с ураном и торием мы следили за тем, чтобы исключить всякое побочное излучение, которое могло бы исказить результаты. Такие предосторожности особенно необходимы в том случае, когда излучение проходит через металл значительной толщины, поскольку в этом случае скорость разряда сильно уменьшается. Обычно мы пользовались таким методом: слой активной соли покрывался металлическим экраном, а на него накладывалась большая свинцовая пластина, в которой было вырезано прямоугольное отверстие, по площади меньшее, чем слой соли. Свинец крепко прижимался к соли, и излучение проходило только через металлический экран, поскольку слой свинца был слишком толст для этого излучения.

§ 8. Поглощение излучения урана в газах

При прохождении через газ α-излучение урана и его соединений сильно поглощается. Мы измерили поглощение этого излучения в водороде, воздухе и углекислом газе и обнаружили, что поглощение меньше всего в водороде и больше всего в углекислом газе. Для измерения поглощения использовался прибор, показанный на рис. 3.

На тонкую металлическую пластинку *P* диаметром 11 *см* равномерно наносился слой сульфата урана-калия или окиси урана. Над этим слоем помещался стеклянный сосуд *G* диаметром 12 *см*. Две параллельные металлические пластины *A* и *B* на расстоянии от 1 до 5 *см* одна от другой были изолированы эбонитовыми столбиками. В пластинке *A* было прорезано круглое отверстие диаметром 7 *см*, закрытое алюминиевой фольгой толщиной 0,0005 *см*. Пластина *B* была связана с винтовым устройством *S* при помощи стержня *R*, так что конденсатор *AB* можно было двигать как целое параллельно базовой пластине. Система *AB* была установлена параллельно поверхности урана и при вращении винта поворачиваться не могла. Стержень *R* проходил через короткую стеклянную трубку, вставленную в эбонитовую платинку *G*. Через стеклянную трубку был пропущен небольшой отрезок трубки *T* из индийского каучука для изоляции фланца, в который ввинчивался стержень *R*. Эта трубка служила в качестве обычного уплотнения, что позволяло изменять расстояние между конденсатором *AB* и ураном при низких давлениях.

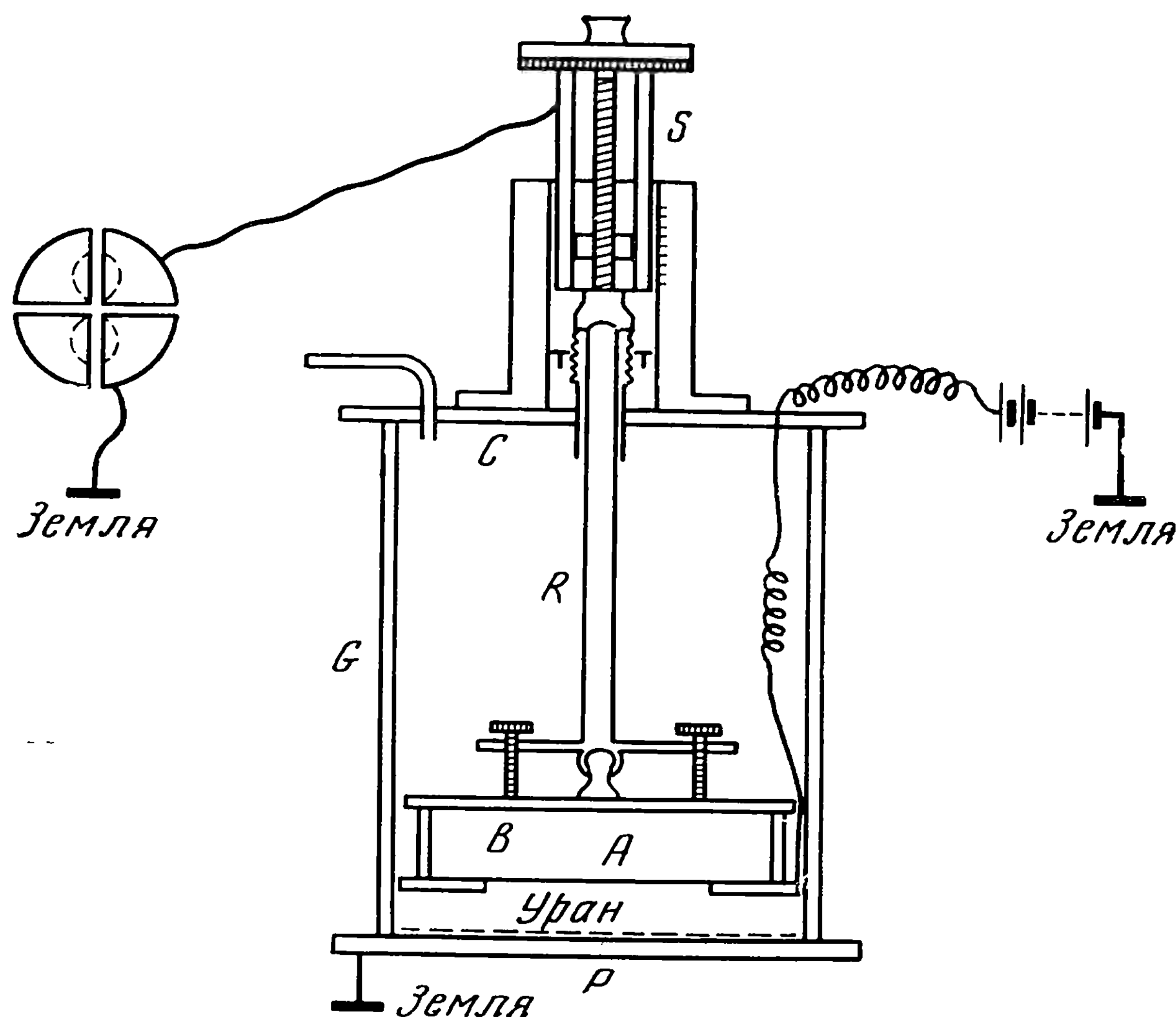


Рис. 3

Таблица 6

Расстояние от алюминиевой фольги до урана, *мм*	Скорость разряда между пластинами			
	Водород	Воздух	Углекислый газ	Светильный газ
d	1	1	1	1
$d+1{,}25$	—	—	0,74	—
$d+2{,}5$	—	0,67	0,57	0,81
$d+3{,}75$	—	—	0,41	—
$d+5$	0,84	0,45	0,32	0,63
$d+7{,}5$	—	0,31	—	—
$d+10$	0,67	0,21	—	0,39
$d+12{,}5$	—	0,16	—	—
$d+15$	0,53	—	—	0,22

Пластина A соединялась с одним полюсом батареи на 60 *в*, другой полюс которой заземлялся. Пластина B через винт соединялась с одной парой квадрантов электрометра, а другая пара квадрантов заземлялась. Было обнаружено, что внутреннюю поверхность стеклянного цилиндра необходимо покрыть оловянной фольгой во избежание скапливания на стеклянной поверхности электростатического заряда, появляющегося вследствие проводимости между ураном и расположенным рядом с ним стеклом. Оловянная фольга и основание P были заземлены.

Поскольку можно предположить, что слой урана испускает излучение равномерно со всей поверхности, то интенсивность излучения вблизи поверхности урана будет приблизительно однородна. Если газ не поглощает излучения, то можно было ожидать, что интенсивность излучения будет слабо изменяться с расстоянием, если это расстояние мало по сравнению с диаметром излучающей поверхности.

Излучение, проходящее через алюминий, вызывает проводимость между пластинами A и B (см. рис. 3). и скорость разряда зависит от интенсивности излучения, проходящего через определенную толщу газа и алюминиевую фольгу. Когда система AB отодвигается от основной пластины, то поглощение излучения в газе быстро возрастает и мы должны ожидать быстрого падения скорости разряда, что и наблюдается на опыте. В табл. 6 даны результаты, полученные в опытах с воздухом, водородом, углекислым и светильным газами. Первое измерение производилось при расстоянии d от алюминиевой фольги до базовой пластины, равном 3,5 *мм*.

Для удобства сравнения скорость разряда в каждом газе при расстоянии, равном d, принималась за единицу. Фактическая скорость разряда

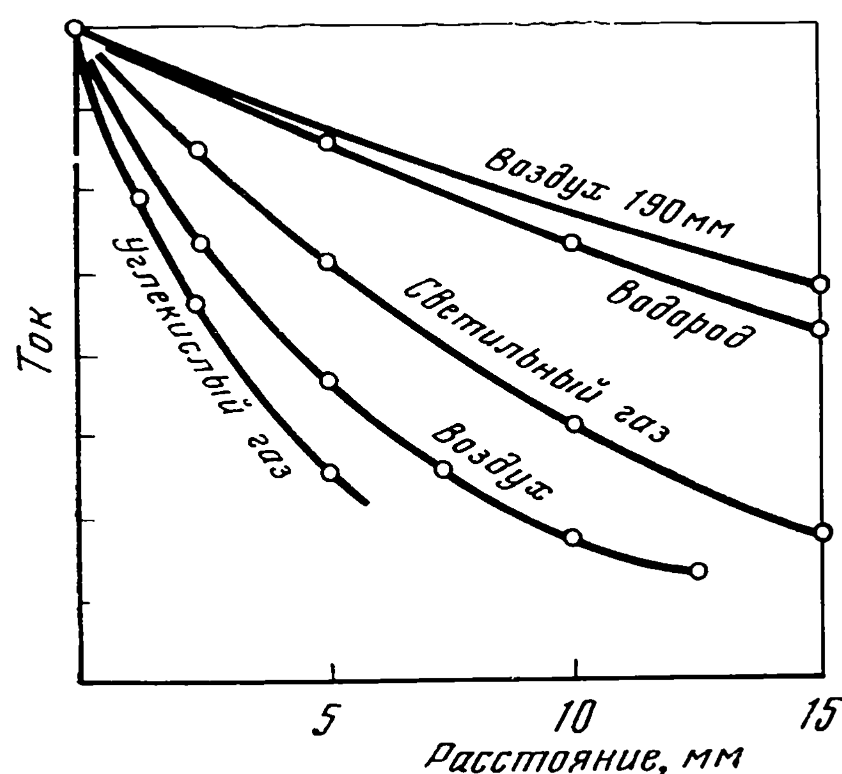


Рис. 4

за 1 *мин* (в делениях шкалы) между A и B при расстоянии d приводится ниже:

Водород	25
Светильный газ	35
Воздух	28
Углекислый газ	18

Результаты, приведенные выше, показаны графически на рис. 4; по оси ординат отложен ток, а по оси абсцисс — расстояние от основания прибора. Видно, что ток быстрее всего уменьшается в углекислом газе и медленнее всего в водороде. Когда расстояние от основания увеличивается в арифметической прогрессии, скорость разряда уменьшается приблизительно в геометрической прогрессии. Быстрое уменьшение тока происходит за счет поглощения излучения в газе. На рис. 4 показано уменьшение тока в воздухе при давлении 190 *мм* рт. ст. Так как при этом давлении поглощение в воздухе меньше, чем при нормальном давлении, то скорость разряда уменьшается с расстоянием гораздо медленнее.

В описанных опытах проводимость в газах вызывалась как α-, так и β-излучением. Однако поскольку в этих опытах мы использовали тонкий слой окиси урана, то разрядом от β-излучения по сравнению с разрядом от α-излучения можно пренебречь.

Результаты, которые были получены при измерении скорости разряда в зависимости от расстояния, просто объясняются теорией ионизации газа при прохождении излучения. Предполагается, что степень ионизации пропорциональна интенсивности излучения (как и в случае проводимости под действием лучей Рентгена) и что интенсивность излучения около поверхности урана постоянна в плоскости, параллельной этой поверхности. Это выполняется очень точно в случае, когда расстояние от поверхности урана мало по сравнению с диаметром излучающей поверхности.

Для простоты рассмотрим случай, когда плоскость урана бесконечна и излучение однородно.

Если I — интенсивность излучения вблизи поверхности урана, то интенсивность на расстоянии x равна $Ie^{-\lambda x}$, где λ — коэффициент поглощения в газе. При прохождении через слой алюминиевой фольги A (см. рис. 3) интенсивность уменьшается в определенное число раз, независимо от расстояния между фольгой и ураном. Таким образом, после прохождения излучения через алюминий интенсивность на расстоянии x равна $\varkappa Ie^{-\lambda x}$, где $\varkappa$ — константа. Число ионов, образующихся между двумя параллельными плоскостями A и B, расположенными на расстоянии x и на расстоянии $x + dx$ от поверхности урана, пропорционально, таким

образом, величине $\varkappa I e^{-\lambda x}\,dx$. Если r — расстояние между A и ураном, l — расстояние между A и B, то суммарное число ионов, образующихся между A и B, пропорционально величине

$$\int\limits_{r}^{l+r} I\varkappa e^{-\lambda x} dx,$$

или

$$\frac{\varkappa I}{\lambda} e^{-\lambda r}\{1 - e^{-\lambda l}\}.$$

Когда между A и B действует «насыщающая» э.д.с. (см. § 16), ток пропорционален полному числу образующихся ионов. Далее, если система AB отодвигается от излучающей поверхности, то величина $\frac{\varkappa I}{\lambda}(1 - e^{-\lambda l})$ остается постоянной для любого газа. Таким образом, мы видим, что скорость разряда пропорциональна $e^{-\lambda r}$, или же скорость разряда уменьшается в геометрической прогрессии, когда расстояние r увеличивается в арифметической прогрессии.

Этот результат позволяет нам сразу получить значения коэффициента поглощения λ в различных газах из тех данных, которые мы привели выше:

Водород	0,43	Углекислый газ	2,3
Воздух	1,6	Светильный газ	0,93

Те же результаты можно выразить и по-иному: интенсивность излучения бесконечной плоскости урана уменьшается наполовину после прохождения

3 *мм* углекислого газа,	7,5 *мм* светильного газа,
4,3 *мм* воздуха,	16,3 *мм* водорода.

Мы видим, что поглощение минимально в водороде и максимально в углекислом газе, причем по мере увеличения плотности газа оно увеличивается.

Приведенные данные относятся к α-излучению; β-излучение поглощается слабее, и поскольку при его прохождении через газ конденсатор разряжается мало, мы не смогли измерить поглощение β-излучения ни в воздухе, ни в каком другом газе. Поглощение α-излучения в газах происходит гораздо сильнее, чем поглощение лучей от обычной трубки Крукса. В работе [9] показано, что величина λ для излучения от такой трубки составляет 0,01. Коэффициент поглощения α-излучения равен 1,6, т. е. в 160 раз больше. Поглощение β-излучения в газах, вероятно, того же порядка величины, что и поглощение обычных Х-лучей.

§ 9. Зависимость поглощения от давления

Поглощение α-излучения возрастает с увеличением давления, изменяясь при этом практически по линейному закону.

Мы использовали тот же прибор, что изображен на рис. 3, присоединили его к воздушному насосу и измеряли скорость разряда между *A* и *B* при различных расстояниях от основания для давлений 760, 370 и 190 *мм* рт. ст. Результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7

Расстояние от электрода *A*, до урана, *мм*	Скорость разряда между пластинами при давлении воздуха		
	760 *мм* рт. ст.	370 *мм* рт. ст.	190 *мм* рт. ст.
d(=3,5)	1	1	1
$d+2,5$	67	—	—
$d+5$	0,45	0,71	—
$d+7,5$	0,31	—	0,78
$d+10$	0,21	0,51	—
$d+12,5$	0,16	—	—
$d+15$	—	0,36	0,59

Для удобства сравнения скорость разряда при расстоянии d принята за единицу. Из этих результатов можно без труда сделать вывод, что интенсивность излучения уменьшается вдвое после прохождения 4,3 *мм* воздуха при 760 *мм* рт. ст., 10 *мм* воздуха при 370 *мм* рт. ст., 19,5 *мм* воздуха при 190 *мм* рт. ст.

Таким образом, в исследованном диапазоне давлений поглощение приблизительно пропорционально давлению. При более низких давлениях поглощения измерить не удалось, поскольку для заметного поглощения излучение должно пройти большое расстояние.

Второй метод измерения поглощения в газах, основанный на измерении скорости разряда при изменении расстояния между двумя пластинами, описан в § 12.

§ 10. Влияние давления на скорость разряда

Беккерель [1] приводит некоторые результаты опытов по изучению влияния давления, где показывает, что скорость разряда, вызванного излучением, с давлением уменьшается. Этот вопрос исследовали также Битти и де Смолан [10], которые пришли к заключению, что в некоторых случаях скорость разряда изменяется пропорционально давле-

нию, а иногда как корень квадратный из давления, в зависимости от приложенного напряжения. Однако результаты, приведенные авторами в таблице, не согласуются ни с одним из этих законов и в действительности, как я надеюсь показать позднее, соотношение между скоростью разряда и давлением очень сильно изменяется, причем существенно зависит как от расстояния между ураном и окружающими его проводниками, так и от рода используемого газа. Хотя этот вопрос очень осложняется вследствие сильного поглощения излучения в газе, однако все полученные результаты можно объяснить, предположив, что скорость образования ионов в любой точке изменяется пропорционально *интенсивности* излучения и *давлению* газа.

Чтобы выяснить, как влияет давление, мы провели измерения на приборе, аналогичном тому, который изображен на рис. 3, с той лишь разницей, что пластина *A* была удалена. На центральную часть нижней пластины наносится однородный слой окиси урана. Передвижная пластина, подсоединенная к электрометру, имела диаметр 10 *см* и двигалась параллельно поверхности урана. Основание соединялось с одним полюсом батареи напряжением 100 *в*, другой полюс которой был соединен с землей. Скорость движения стрелки электрометра мы принимали за меру тока между пластинами.

В некоторых случаях мы покрывали соединение урана тонким слоем алюминиевой фольги, и, хотя это уменьшало скорость разряда, полученные нами общие соотношения оставались неизменными.

В табл. 8 приведены результаты, полученные в воздухе, водороде и углекислом газе при различных давлениях и разности потенциалов между пластинами 100 *в*, достаточной для «насыщения» воздуха и водорода. Чтобы достичь заметного насыщения в углекислом газе, необходимы гораздо бо́льшие напряжения. Для всех газов расстояние между пластинами 3,5 *см*.

Для сравнения в каждом случае ток при атмосферном давлении принимался за единицу, хотя в действительности скорость разряда для каж-

Таблица 8

Воздух (на основание нанесена окись урана)				Водород		Углекислый газ	
Давление, *мм* рт. ст.	Ток	Давление, *мм* рт. ст.	Ток	Давление, *мм* рт. ст.	Ток	Давление, *мм* рт. ст.	Ток
760	1	150	0,23	760	1	760	1
600	0,86	100	0,17	540	0,73	410	0,92
480	0,74	50	0,088	335	0,46	220	0,69
365	0,56	35	0,062	220	0,29	125	0,38
210	0,32			135	0,18	55	0,175

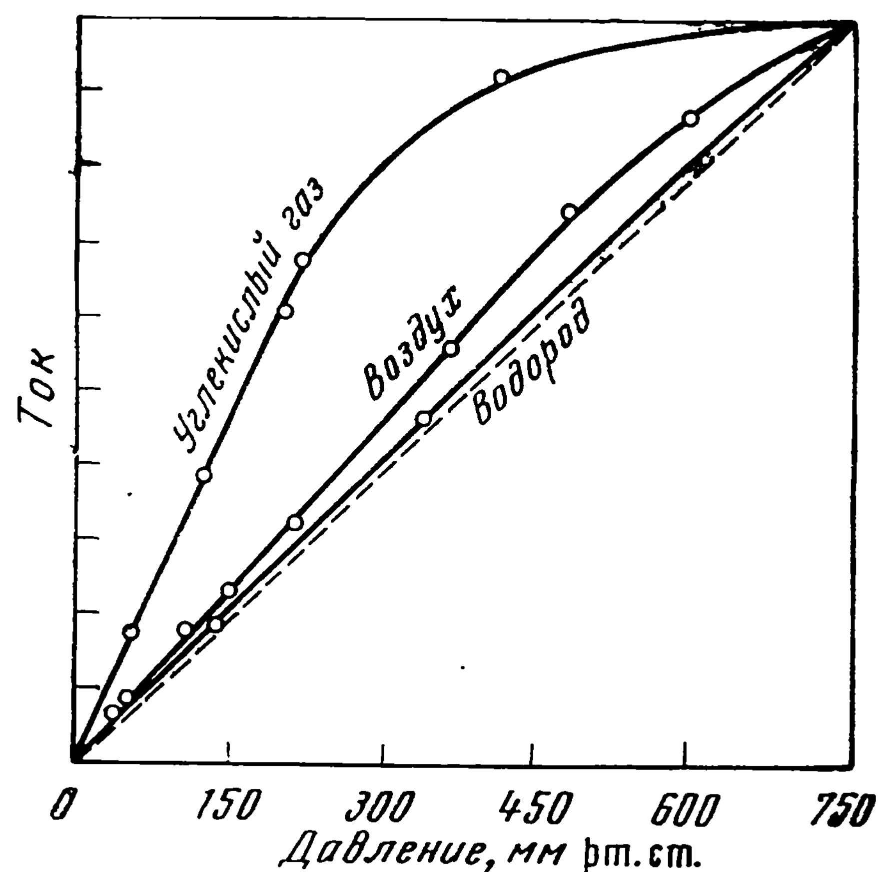


Рис. 5

дого из трех газов была различной. Эти результаты показаны графически на рис. 5, где по оси ординат отложен ток, а по оси абсцисс — давление. Пунктирной линией показано, как шла бы кривая, если бы скорость разряда изменялась пропорционально давлению. Мы покажем, что для всех трех газов скорость разряда сначала возрастает пропорционально давлению, а при дальнейшем увеличении давления возрастание происходит по более медленному закону. Это различие меньше всего заметно в водороде и наиболее заметно в углекислом газе. В водороде скорость разряда почти пропорциональна давлению.

Соотношение между скоростью разряда и давлением зависит также от расстояния между пластинами. Мы приведем несколько цифр, типичных для наших опытов (табл. 9). Разность потенциалов составляла при этом 200 *в*, а скорость разряда приводится в делениях шкалы за 1 *мин.*

Скорость разряда при небольших расстояниях между пластинами зависит от давления более линейным образом, чем при больших расстояниях.

Разницу в результатах опытов с различными газами и при разных расстояниях можно просто объяснить, если учесть, что интенсивность излучения между пластинами быстро спадает за счет поглощения в газе.

Таблица 9

Давление, *мм* рт. ст.	Скорость разряда при расстоянии между пластинами	
	2,5 *мм*	15 *мм*
187	11	47
376	21	83
752	41	127

Из табл. 9 видно, что при небольших расстояниях между пластинами и соответственно слабом поглощении в газе скорость разряда пропорциональна давлению. При слабом поглощении интенсивность излучения между пластинами приблизительно однородна и, таким образом, ионизация газа происходит однородно во всем объеме между пластинами. Поскольку при насыщающей э.д.с. скорость разряда пропорциональна

полной ионизации, то описанные выше опыты показывают, что скорость образования ионов в любой точке пропорциональна давлению. Выше мы показали, что излучение поглощается приблизительно пропорционально давлению.

Пусть q — скорость образования ионов вблизи поверхности урана при давлении, равном единице; λ_0 — коэффициент поглощения в газе при том же давлении.

Легко видеть, что полное число ионов, образованных между пластинами, при расстоянии d между ними и при единичной площади пластин, равно

$$pq\int_0^d e^{-p\lambda_0 x}\,dx,$$

или

$$\frac{q}{\lambda_0}(1-e^{-p\lambda_0 d}),$$

так как мы уже показали, что ионизация и поглощение пропорциональны давлению. Если мы прикладываем к газу насыщающую э.д.с., то отношение скорости разряда при давлении p_1 к скорости разряда при давлении p_2 равно отношению r полного числа ионов, образованных при давлении p_1, к полному числу ионов, образованных при давлении p_2:

$$r=\frac{1-e^{-p_1\lambda_0 d}}{1-e^{-p_2\lambda_0 d}};$$

$p_1\lambda_0$ — коэффициент поглощения в газе при давлении p_1. Если поглощение между пластинами мало, то $p_1\lambda_0 d$ и $p_2\lambda_0 d$ малы и величина r принимает вид

$$r=\frac{p_1}{p_2},$$

т. е. при небольших давлениях скорость разряда пропорциональна давлению.

Если и при давлении p_1 и при давлении p_2 поглощение между пластинами велико, то значение r практически равно единице и скорость разряда почти не зависит от давления. Экспериментальные результаты для этого случая показаны графически на рис. 7.

Для значений поглощения, лежащих где-то посредине между этими случаями, величина r изменяется с давлением медленнее, чем следует из линейного закона.

Кривые, полученные при одном и том же расстоянии между пластинами в воздухе и водороде, отличаются за счет большего поглощения в воздухе. Чем меньше поглощение в газе, тем больше зависимость скорости разряда от давления приближается к линейной. В углекислом газе скорость разряда падает с давлением значительно слабее, чем в водороде;

частично это происходит потому, что углекислый газ гораздо сильнее поглощает, а частично потому, что при напряжении 100 *в* углекислый газ еще не насыщен.

Если мы будем измерять скорость разряда между двумя параллельными пластинами, находящимися на некотором расстоянии от источника излучения, то получим несколько удивительный результат: при уменьшении давления скорость разряда вначале возрастает, хотя между пластинами приложена насыщающая э.д.с.

В этом опыте мы применяли прибор, подобный изображенному на рис. 3. Скорость разряда измерялась между пластинами A и B, расстояние между которыми составляло 2 *см*. Пластина A была расположена на расстоянии примерно 1,5 *см* от поверхности урана. Полученные результаты приведены ниже:

Давление, *мм* рт. ст.	760	645	525	380	295	180	100	49
Ток	1	1,46	2	2,2	2,05	1,6	1,04	0,58

Ток при атмосферном давлении принимался за единицу. Результаты представлены графически на рис. 6.

При давлении, несколько меньшем половины атмосферного, скорость разряда достигает максимума, а затем падает. При давлении 100 *мм* рт. ст. скорость разряда еще несколько больше, чем при атмосферном давлении. Такой результат легко объяснить большим поглощением излучения при атмосферном давлении и уменьшением поглощения при понижении давления.

Пусть d_1 — расстояние от пластины A до урана, а d_2 — расстояние от пластины B до урана.

Учитывая высказанное выше замечание, мы сразу получаем, что суммарная ионизация между пластинами A и B (в предположении, что размеры активной поверхности бесконечны) равна

$$\frac{q}{\lambda}\{e^{-p\lambda_0 d_1} - e^{-p\lambda_0 d_2}\}.$$

Это выражение является функцией давления, и оно достигает максимума при

$$d_1 e^{-p\lambda_0 d_1} - d_2 e^{-p\lambda_0 d_2} = 0,$$

т. е. когда

$$\ln\frac{d_1}{d_2} = -p\lambda_0(d_2 - d_1).$$

Для воздуха при давлении 760 *мм* рт. ст. значение $p\lambda_0$ равно 1,6.

Если $d_2 = 3$ *см*, а $d_1 = 1$ *см*, то скорость разряда достигает максимума, когда давление составляет около $^1/_3$ атмосферного. Поскольку в нашем приборе пластины находились на большом расстоянии от поверхности

урана, то мы не можем сравнивать экспериментальные данные с теорией.

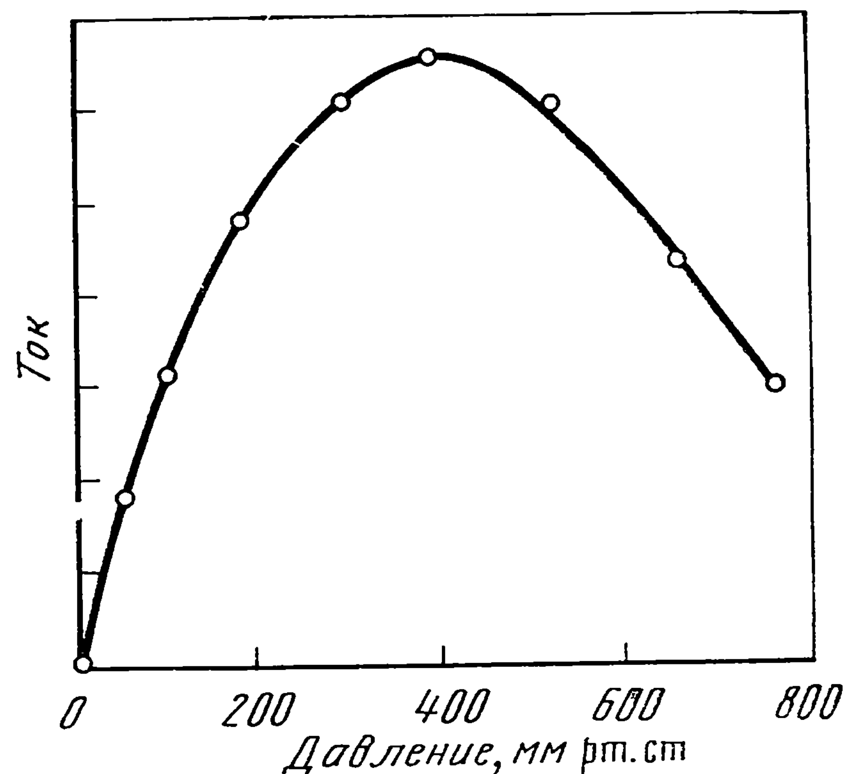


Рис. 6

При всех измерениях зависимости скорости разряда от давления мы прикладывали между пластинами большую э.д.с., чтобы обеспечить пропорциональность тока полной ионизации газа. При низких напряжениях соотношение между током и давлением может быть совершенно другим, а также может сильно меняться как от напряжения и расстояния между электродами, так и от рода газа. Мы не сочли целесообразным приводить в этой статье результаты, полученные при малых напряжениях, поскольку они сильно зависят от условий, в которых проводился опыт. Хотя эти результаты можно довольно просто объяснить, используя данные, полученные с насыщающей э.д.с., однако они не поддаются простому расчету и лишь затрудняют понимание простых законов, которые управляют соотношениями между ионизацией, поглощением и давлением. Общие закономерности полученных результатов можно вывести из соотношений между током через газ и приложенной э.д.с. при различных давлениях (см. § 16).

Описанные выше результаты, показывающие соотношение между током и давлением, можно сравнить с результатами, полученными в опытах с лучами Рентгена. Перрен [11] обнаружил, что скорость разряда при насыщающей э.д.с. меняется с давлением линейно, если при этом излучение не попадает на поверхность металлических пластин. Этот результат находится в согласии с результатами опыта с излучением урана; так как фактически опыты Перрена доказывают, что ионизация пропорциональна давлению. Однако результаты аналогичных опытов, проведенных другими исследователями, очень противоречивы и сильно отличаются между собой. Это происходит главным образом за счет того, что в некоторых случаях измерения проводились при ненасыщающей э.д.с. и, кроме того, существенно усложнялись поверхностной ионизацией на электродах, что особенно важно при низких давлениях.

§ 11. Степень ионизации различных газов

Как было показано, α-излучение урана сильно поглощается в воздухе и других газах, поэтому полную величину ионизации можно определить из опытов при полном поглощении излучения.

Мы использовали следующий прибор: на латунный шар диаметром 2,2 *см* наносился тонкий слой окиси урана. В шар ввинчивался тонкий

латунный стержень, и шар укреплялся в центре колоколообразного конденсатора диаметром 13 *см*, причем латунный стержень пропускался внутрь конденсатора через эбонитовую пробку. Конденсатор был сделан воздухонепроницаемым и укреплен на основании. Внутренняя и внешняя поверхности конденсатора были покрыты оловянной фольгой. К внешней обкладке конденсатора мы прикладывали э.д.с. до 800 *в*. Через металлический стержень шар подсоединялся к одной паре квадрантов электрометра. Можно было предполагать, что при такой большой разности потенциалов между корпусом конденсатора и шаром газ будет практически полностью насыщен и скорость движения стрелки электрометра будет пропорциональна полному числу ионов, образующихся в газе. Приведем некоторые из полученных результатов полной ионизации газов, причем скорость разряда в воздухе принята за 100:

Воздух	100	Светильный газ	111
Водород	95	Хлористый водород	102
Кислород	106	Аммиак	101
Углекислый газ	96		

Результаты для хлористого водорода и аммиака — приближенные, ибо мы обнаружили, что оба газа несколько изменяют излучение, испускаемое окисью урана. Например, перед впуском газа в измерительный прибор скорость разряда в воздухе составляла 100 делений за 69 *сек*; а после того, как конденсатор был заполнен хлористым водородом, скорость разряда составила 100 делений за 72 *сек*; после того, как газ был откачан, снова в воздухе 100 делений за 74 *сек*.

Скорость разряда была максимальной в светильном газе и минимальна в водороде, но, однако, степень ионизации во всех газах приблизительно такая же, как в воздухе. В рассматриваемом случае ионизацию в газе производят оба типа излучения, испускаемые ураном. Мы обнаружили, что если окись урана накрыть несколькими листками тонкой алюминиевой фольги, скорость разряда в нашем приборе, которая в этом случае будет обусловлена действием проникающих лучей, мала по сравнению со скоростью разряда от α-излучения.

Влияние давления на скорость разряда в воздухе, водороде и углекислом газе показано на рис. 7, где по оси абсцисс отложено давление, а по оси ординат — скорость разряда. Мы обнаружили, что в воздухе и углекислом газе скорость разряда при уменьшении давления сначала слегка возрастает. Это объясняется тем, что для полного насыщения газа при атмосферном давлении недостаточно даже напряжения 800 *в*, которое мы прикладывали между ураном и окружающими его проводниками. Необходимо отметить, что скорость разряда в воздухе практически постоянна вплоть до давления 400 *мм* рт. ст., а для углекислого газа — вплоть до давления 200 *мм* рт. ст. Однако в водороде скорость разряда изменяется с давлением быстрее, и это говорит о том, что излучение, испускаемое

ураном при атмосферном давлении, поглощается неполностью и полная ионизация, по-видимому, больше приведенной выше.

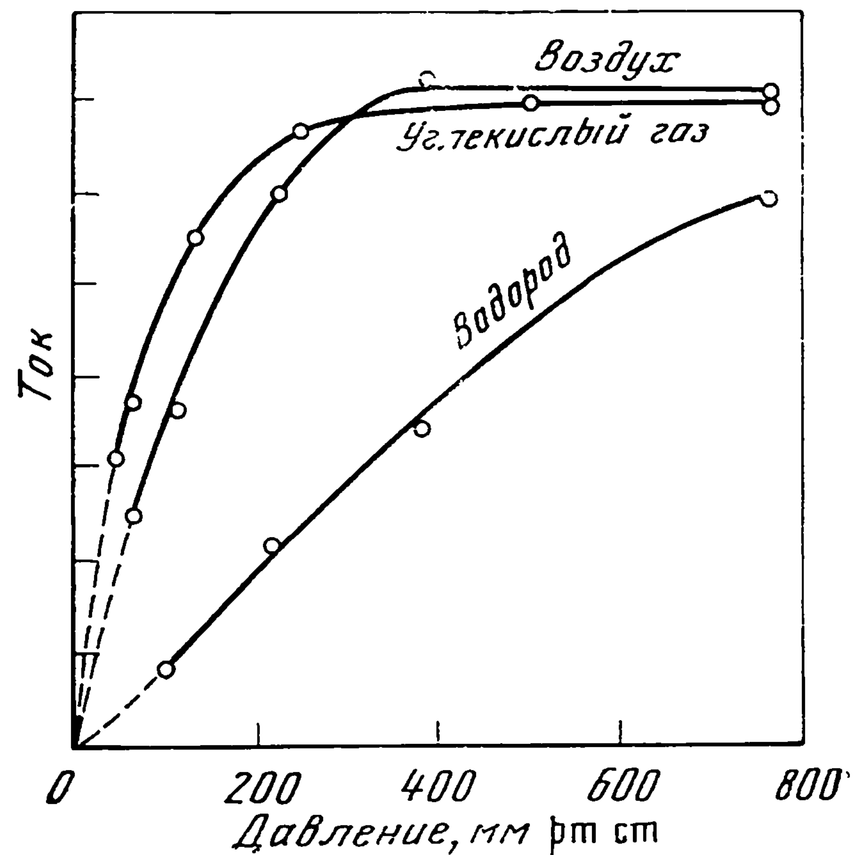


Рис. 7

Если предположить, что уран испускает излучение одинаковой энергии, независимо от газа, окружающего образец урана, и излучение почти полностью поглощается в газе, то окажется, что при одном и том же поглощении энергии степень ионизации приблизительно одинакова во всех газах. Это очень интересный результат, так как он дает некоторую информацию о соотношении энергий, требуемых для ионизации различных газов. Как бы ни происходил процесс ионизации, в любом случае существует поглощение энергии, и энергия, требуемая для разделения одинакового количества зарядов, которые переносятся ионами газа, приблизительно одинакова для всех исследованных газов.

Из приведенных только что результатов видно, как неоднозначно понятие проводимости газа, вызванной излучением урана. Соотношение между проводимостями различных газов, измеренное по скорости разряда, очень сильно зависит от расстояния между электродами. Когда расстояние между электродами (т. е. между двумя параллельными пластинками) мало, то скорость разряда в углекислом газе превышает его скорость в воздухе, а скорость в воздухе больше, чем в водороде. По мере увеличения расстояния между пластинами все эти величины стремятся приблизительно к одному и тому же значению. Но если измеряется скорость разряда между двумя пластинами, расположенными на некотором расстоянии от излучающей поверхности (пластины A и B на рис. 3), то соотношение между скоростями разряда в различных газах будет зависеть от расстояния между пластиной A и поверхностью урана. Если пластина A расположена в нескольких сантиметрах от поверхности урана, то скорость разряда в водороде будет больше скорости в воздухе, а в воздухе больше, чем в углекислом газе,— результат, совершенно противоположный предыдущему. Все эти рассуждения применимы и к проводимости газа под действием излучения урана.

В опубликованной ранее работе [9] я установил, что коэффициент поглощения лучей Рентгена в газе приблизительно пропорционален проводимости газа. Проводимость в этом опыте измерялась по скорости разряда между двумя близко расположенными пластинами, которые помещались вблизи трубки Крукса. Поглощение в воздухе между трубкой и регистрирующим прибором было невелико. Если бы газ мог пол-

ностью поглотить рентгеновское излучение, то при измерении проводимости суммарный ток не должен был бы зависеть от рода газа, в котором поглощается излучение. К такому выводу можно прийти сразу, если считать, что во всех газах поглощение пропорционально образовавшейся ионизации. Таким образом, результаты опытов с излучением урана и лучами Рентгена в этом отношении совпадают.

§ 12. Зависимость тока между двумя пластинами от расстояния между ними

Использовался прибор, подобный изображенному на рис. 3, но без пластины *А*. Внутри колоколообразного конденсатора были горизонтально расположены две полированные цинковые пластины диаметром 10 *см*. Нижняя пластина была закреплена и покрыта равномерным слоем окиси урана, а верхнюю пластину можно было передвигать относительно нижней при помощи винта. Колоколообразный конденсатор вакуумно уплотнялся и подсоединялся к воздушному насосу. Нижняя пластина присоединялась к одному полюсу батареи напряжением 200 *в*, другой полюс которой был заземлен, а изолированная верхняя пластина соединялась с электрометром. Внешняя поверхность стекла была покрыта оловянной фольгой, которая соединялась с землей.

В табл. 10 даны результаты измерения скорости разряда в зависимости от расстояния между пластинами. Измерения проводились в воздухе при давлениях 752, 376 и 187 *мм* рт. ст. Результаты подкорректированы, поскольку при перемещении пластин изменялась емкость электрометра.

Таблица 10

Расстояние между пластинами, *мм*	Скорость разряда в 1 *мин*, деления шкалы		
	752 *мм* рт. ст.	376 *мм* рт. ст.	187 *мм* рт. ст.
2,5	41	21	
5	70	40	20
7,5	92	53	
10	109	65	36
12,5	123	76	
15	128	83	47

Результаты представлены графически на рис. 8, где по оси абсцисс отложено расстояние между пластинами, а по оси ординат — скорость разряда. Приведенные выше значения соответствуют скорости разряда при насыщении. В этих опытах газ практически полностью насыщался при напряжении 200 *в*, даже когда самое большое расстояние между пластинами было равно 1,5 *см*.

Следует отметить, что при небольших расстояниях между пластинами скорость разряда возрастает почти пропорционально расстоянию, а при большом расстоянии скорость разряда в воздухе при атмосферном давлении возрастает с расстоянием очень медленно.

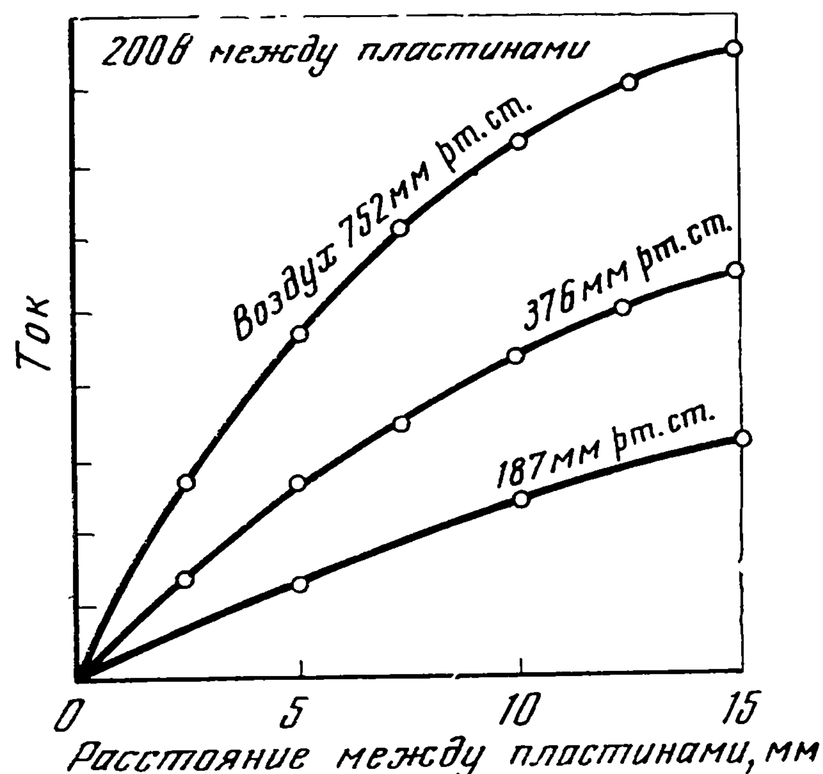


Рис. 8

Если бы газ слабо поглощал излучение, то ионизация между пластинами была бы практически однородной при условии, что диаметр поверхности урана велик по сравнению с самым большим расстоянием между пластинами. В этом случае скорость разряда при насыщении изменялась бы пропорционально расстоянию. Если газ сильно поглощает излучение, то ионизация максимальна вблизи поверхности урана и с расстоянием быстро спадает. Таким образом, при насыщении скорость разряда будет сначала увеличиваться с расстоянием, а когда излучение поглотится между пластинами полностью, скорость разряда будет стремиться к постоянному значению.

По результатам, приведенным в табл. 10, можно определить коэффициент поглощения в воздухе при различных давлениях. В этих опытах я прежде всего обратил внимание на быстрое поглощение излучения.

Число ионов, образующихся между двумя параллельными пластинами, расположенными на расстоянии d, равно

$$pq\int_0^d e^{-p\lambda_0 x}\,dx,$$

т. е.

$$\frac{q}{\lambda_0}(1-e^{-p\lambda_0 d}),$$

если предположить, что поглощение пропорционально давлению (обозначения здесь те же, что в § 10.). Таким образом, при давлении p скорость разряда при насыщении пропорциональна величине $1-e^{-p\lambda_0 d}$.

Если величины p и d изменять таким образом, чтобы произведение $p\times d$ оставалось постоянным, то постоянной будет и скорость разряда. Как следует из приведенных выше численных результатов (см. рис. 8), это подтверждается достаточно точно на опыте. Однако при этом нужно обратить внимание на то, что условия, на основании которых проводятся расчеты, на практике выполняются лишь приблизительно, ибо мы предположили, что поверхность урана не ограничена и происходит полное насыщение.

Зависимость скорости разряда от расстояния достаточно хорошо совпадает с теорией. Когда величина $p\lambda_0 d$ мала, скорость разряда почти пропорциональна расстоянию между пластинами и давлению газа; когда $p\lambda_0 d$ велика, скорость разряда изменяется с расстоянием очень медленно.

Значение $p\lambda_0$ можно получить из опыта, так что мы можем независимым способом определить поглощение излучения при различных давлениях.

Чем меньше давление, тем однороднее ионизация между пластинами, поэтому при низких давлениях скорость разряда при насыщении почти пропорциональна расстоянию между пластинами. Это иллюстрирует рис. 8, где эта зависимость при давлении 187 *мм* рт. ст. представляет собой почти прямую линию. Аналогичные результаты были получены в водороде и углекислом газе.

§ 13. Скорость рекомбинации ионов

Проходящий над поверхностью соединений урана воздух приобретает способность разряжать как отрицательно, так и положительно заряженные тела. Чтобы определить, сколько времени длится проводимость, вызванная излучением урана, мы собрали следующий прибор: листок плотной бумаги покрывался тонким слоем гуммиарабика, а затем на него распылялся мелкий порошок окиси урана или сульфата урана-калия. После того как листок высыхал, мы его сворачивали в трубочку так, чтобы слой урана оказался внутри. Затем трубочку помещали в металлическую трубку *T* (рис. 9) диаметром 4 *см*. Через цилиндр *T* и далее

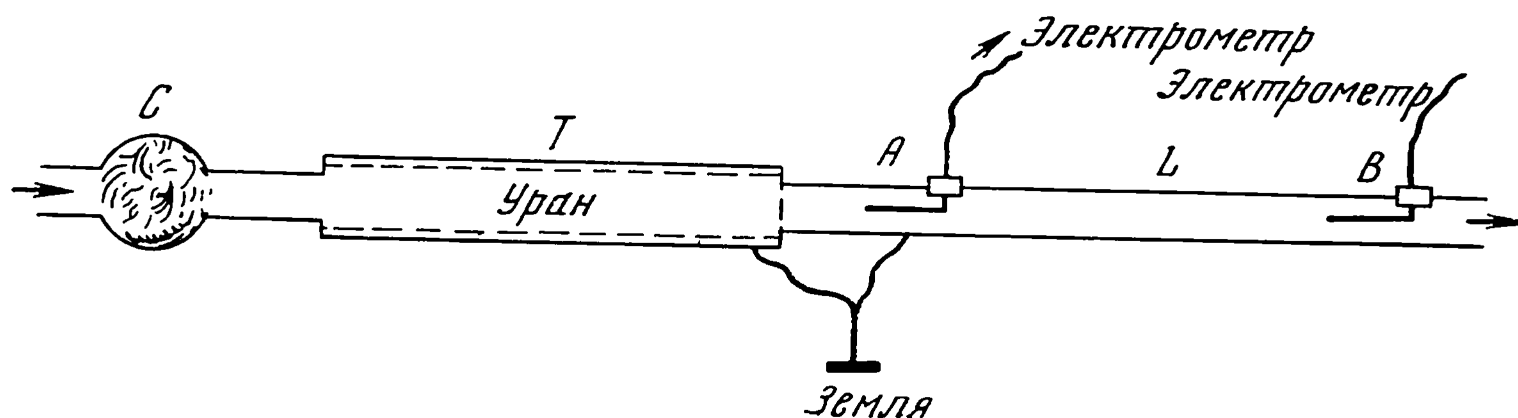


Рис. 9

через длинную металлическую трубу, соединенную электрически с землей, продувался воздух от газометра. Чтобы удалить пыль, воздух проходил через шерстяной фильтр *C*.

В металлической трубе были расположены изолированные электроды *A* и *B*. К этим электродам можно было поочередно подсоединять электрометр. В начале опыта мы соединили между собой квадранты электрометра. Затем электрод *A* (или *B*) и электрометр заряжались до потенциала 30 *в*, после чего квадранты разъединялись.

Когда уран из прибора удаляли, ни электрод A, ни электрод B при прохождении по трубе сильного потока воздуха не разряжались. Когда же трубочку с ураном вставили обратно и продували по трубе воздух, электрометр показал наличие разряда, длившегося до тех пор, пока электроды не разрядились.

Когда электрод A был заряжен до 30 *в*, электрод B не разряжался. Таким образом, скорость разряда электродов A и B пропорциональна полному числу ионов в газе. Ионы рекомбинируют в тот промежуток времени, который требуется воздуху, чтобы пройти расстояние от A до B. Таким образом, при напряжении насыщения скорость разряда электрода B, если электрод A заземлен, меньше, чем электрода A.

В одном из опытов скорость разряда электрода A составляла 146 делений в 1 *мин*. Когда электрод A заземлялся, скорость разряда электрода B при насыщении составляла 100 делений в 1 *мин*. Расстояние между электродами A и B было 44 *см*, а средняя скорость потока воздуха составляла 70 *см/сек*. Следовательно, за 0,63 *сек* проводимость падала с единицы до 0,68.

Если мы допустим, как в случае рентгеновского излучения [2], что проводимость уменьшается вследствие рекомбинации ионов, то число ионов должно уменьшаться со временем согласно выражению

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha n^2.$$

где n — число ионов в 1 *см*^{3}; α — постоянная. Если N — число ионов около электрода A, то число ионов n около электрода B по истечении времени t определяется выражением

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{N} = \alpha t.$$

Далее, скорость разряда электродов A и B при насыщении пропорциональна N и n, и отсюда можно легко найти, что время, за которое рекомбинирует половина ионов, равно 1,3 *сек*. Эта скорость рекомбинации значительно меньше, чем при ионизации воздуха рентгеновскими лучами вблизи обычной трубки Крукса.

Вообще ионизация излучением урана значительно слабее, чем ионизация рентгеновскими лучами, и время, за которое число ионов уменьшается наполовину, соответственно больше.

В опытах с излучением урана и лучами Рентгена явления рекомбинации ионов очень похожи. Чтобы проверить, действительно ли скорость рекомбинации ионов в газе пропорциональна квадрату их числа, мы поставили следующий опыт.

Мы взяли трубку A (рис. 10) длиной 3 *м* и диаметром 5,5 *см*. Внутреннюю поверхность цилиндра D длиной 25 *см* покрыли окисью урана. Цилиндр вставлялся в широкую трубу, где его можно было передвигать с помощью шнуров, пропущенных через пробки, вставленные в оба конца длинной трубы. Через трубу с помощью газометра продувался

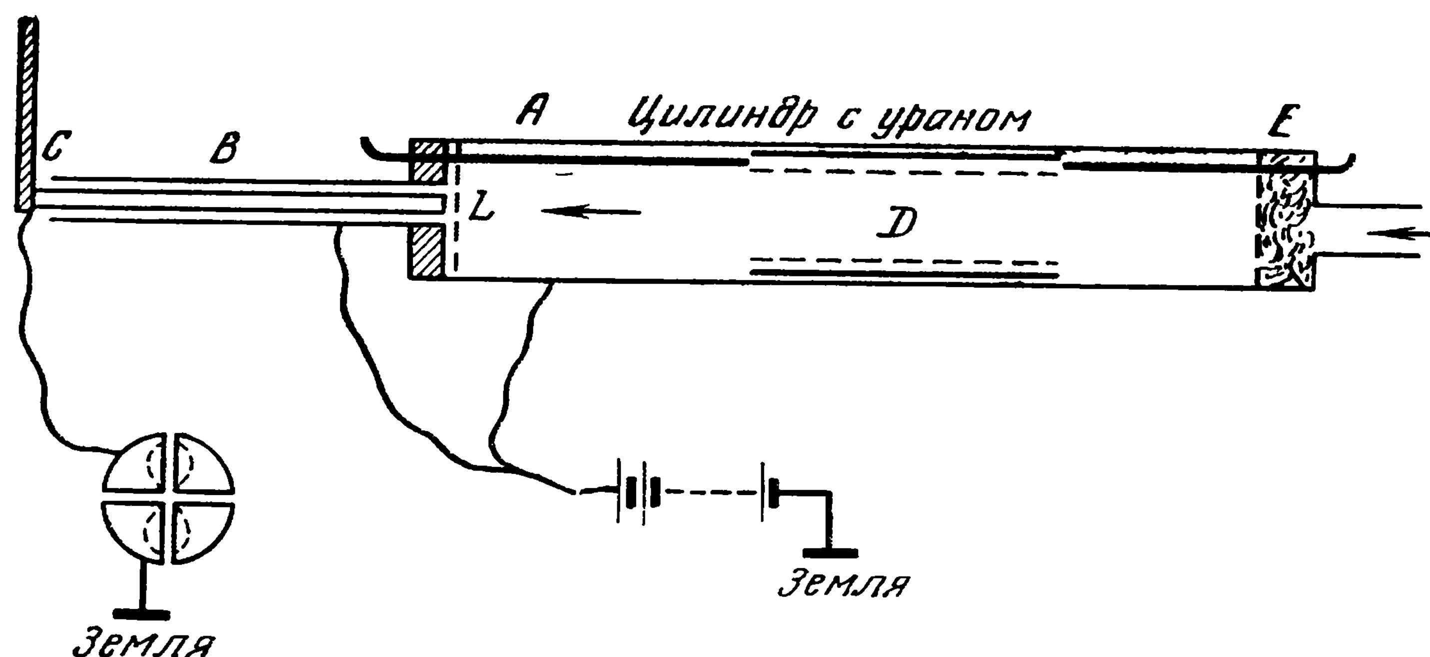


Рис. 10

воздух, причем на входе трубы A был поставлен шерстяной фильтр E, который очищал воздух от пыли и выравнивал поток воздуха по сечению трубы. Воздух проходил над поверхностью урана и затем через сетку L попадал в измерительный цилиндр B диаметром 2,8 *см*. По центру цилиндра B проходил изолированный стержень C диаметром 1,6 *см*, подсоединенный к электрометру. Цилиндры A и B соединялись с одним полюсом батареи напряжением 32 *в*, другой полюс которой был заземлен.

Чтобы почти полностью удалить все ионы, образующиеся в проходящем вдоль цилиндра газе, достаточно было приложить между электродами B и C разность потенциалов 32 *в*. Таким образом, скорость разряда была пропорциональна числу ионов в газе.

Значения скорости разряда для различных расстояний между активным цилиндром и сеткой L представлены в табл. 11.

Таблица 11

Расстояние от активного цилиндра до L, *см*	T, *сек*	Скорость разряда в 1 *мин*, деления шкалы	Вычисленная скорость разряда
d	t	159 *	159 *
$d+25$	$t+1$	111	112
$d+50$	$t+2$	87 *	87 *
$d+100$	$t+4$	62	60
$d+200$	$t+8$	39	37

В первом столбце таблицы приведено расстояние от конца цилиндра с ураном до сетки L. Расстояние d, при котором было сделано первое измерение, составляло около 20 *см*. Во втором столбце записано время, которое требуется потоку воздуха, чтобы пройти заданное расстояние.

Значение t соответствует расстоянию d. Средняя скорость потока воздуха в трубе составляла около 25 *см/сек.* В третьем столбце приводится измеренная, а в четвертом — вычисленная скорость разряда.

Скорость разряда вычислялась в предположении, что скорость рекомбинации пропорциональна числу ионов, т. е.

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha n^2,$$

где n — число ионов; α — константа. Для определения константы в этом уравнении мы использовали два измерения, помеченные в таблице звездочкой. Результаты других измерений при этом совпали с формулой лучше, чем мы ожидали, поскольку в нашем опыте скорость потока воздуха была непостоянна по сечению трубы, и, кроме того, проводимость несколько уменьшалась за счет диффузии ионов на стенки длинной трубы.

Если в газе мало ионов, то скорость рекомбинации мала и проводимость воздуха падает в 4 раза за 8 *сек.*

§ 14. Скорость ионов

Метод, который использовался в работе [12] для определения скорости ионов в газе, на который воздействуют лучи Рентгена, непригоден для опытов с ураном. В этом случае измерять скорость рекомбинации ионов между пластинами вследствие очень небольшой остаточной проводимости нецелесообразно; кроме того, электрическое поле между пластинами существенно изменяется за счет ионизации газа.

Однако можно без особых трудностей сравнивать скорости ионов, образованных в одних и тех же условиях лучами Рентгена и излучением урана. Результаты таких измерений показывают, что в обоих случаях проводимость вызывается ионами одного и того же типа.

Скорости ионов мы сравнивали с помощью прибора, аналогичного показанному на рис. 10. Ионы пропускались около заряженной проволочки A, а около электрода B, расположенного рядом с A, одновременно измерялась проводимость газа. Электрод A представлял собой цилиндр и был укреплен в центре металлической трубы L, соединенной электрически с землей. При расчете мы для удобства предполагаем, что электрическое поле между нашими цилиндрами такое же, как между цилиндрами бесконечной длины.

Пусть a — радиус электрода A; b — внутренний радиус трубы L; V — потенциал электрода A (допустим, положительный).

Электрическая сила X (знак мы не учитываем) на расстоянии r от центра трубы равна

$$X = \frac{V}{r \ln(b/a)}.$$

Пусть u_1 и u_2 — скорости положительных и отрицательных ионов при градиенте потенциала 1 *в/см*. Если скорость в некоторой точке пропорциональна электрической силе, то расстояние dr, которое отрицательный ион проходит за время dt, можно найти из выражения

$$dr = Xu_2\,dt$$

или

$$dt = \frac{\ln(b/a)\,r dr}{Vu_2}.$$

Пусть r_2 — расстояние между центром цилиндра и точкой, из которой отрицательный ион попадает на электрод, затратив на это движение время t, равное времени прохождения потока воздуха вдоль электрода.

Тогда

$$t = \frac{(r_2^2 - a^2)}{2Vu_2}\ln\frac{b}{a}.$$

Если ρ_2 — отношение числа отрицательных ионов, попадающих на электрод A, к общему числу ионов, переносимых потоком воздуха, то

$$\rho_2 = \frac{r_2^2 - a^2}{b^2 - a^2}.$$

Поэтому

$$u_2 = \frac{\rho_2(b^2 - a^2)\ln(b/a)}{2Vt}. \qquad (1)$$

Аналогично, ρ_1 — отношение числа положительных ионов, попадающих на внешний цилиндр, к полному числу ионов определяется выражением

$$u_1 = \frac{\rho_1(b^2 - a^2)\ln(b/a)}{2Vt}. \qquad (2)$$

В приведенных уравнениях предполагается, что поток воздуха однороден по сечению трубы и ионы распределены по сечению равномерно; кроме того, считается, что при движении ионов электрическое поле существенно не изменяется. Поскольку величину t можно вычислить, зная скорость потока воздуха и длину электродов, то отсюда сразу можно определить скорость ионов при единичном градиенте потенциала.

Из уравнения (1) видно, что ρ_2 пропорционально V, т. е. скорость разряда электрода A пропорциональна потенциалу этого электрода. Это справедливо при достаточно малом потенциале V, когда на электрод попадает только часть ионов из потока воздуха. Такая зависимость была подтверждена экспериментально.

В опыте по сравнению скоростей потенциал V подбирался таким, чтобы величина ρ_2 составляла около половины. Это определялось по измерению скорости разряда электрода B при э.д.с., соответствующей

насыщению. Рекомбинация ионов между электродами A и B очень мала, и ею можно пренебречь.

Затем мы убирали из трубы цилиндр с ураном, оставив все остальные части прибора в прежнем положении. Цилиндр с ураном заменялся алюминиевым цилиндром, на который направлялись X-лучи. Трубка Крукса и индукционная катушка помещались в металлический цилиндр, чтобы защитить измерительный прибор от электростатических наводок. Лучи направлялись только на центральную часть цилиндра. Интенсивность рентгеновского излучения подбиралась такой, чтобы скорость разряда от X-лучей была близка к скорости разряда от излучения урана. Мы обнаружили, что величина ρ_2 имела приблизительно то же самое значение, что и в случае проводимости от урана. Например, когда воздух продувался над поверхностью урана, скорость разряда электрода B падала с 38 до 14 делений шкалы в 1 *мин*, если при этом электрод A был заряжен до небольшого потенциала. В опыте с рентгеновским излучением скорость разряда при тех же условиях упала с 50 до 18 делений в 1 *мин*. Величина ρ_2 в этих опытах была 0,63 и 0,64 соответственно. Это совпадение существенно лучше, чем можно было ожидать, поскольку трубка давала не очень стабильное излучение.

Приведенные результаты показывают, что как в случае проводимости, вызванной лучами Рентгена, так и в случае проводимости, вызванной излучением урана, ионы движутся с одинаковыми скоростями и, по-видимому, идентичны. Скорость иона при движении в газе пропорциональна e/m, где e — заряд, переносимый ионом, а m — масса иона. Если считать, что e и m не изменяются пропорционально, то из этого результата следует, что в обоих случаях заряд, переносимый ионом, один и тот же и, кроме того, массы ионов одинаковы.

Мы обнаружили, что скорость отрицательного иона несколько больше скорости положительного. Такое же явление наблюдалось и с ионами, образованными рентгеновским излучением [13]. Это различие в скоростях положительного и отрицательного носителей легко показать экспериментально. Электрод B может разряжаться и при положительном и при отрицательном заряде. Когда электрод B заряжен положительно, то скорость разряда определяется числом отрицательных ионов, поступающих от электрода A, а когда электрод B заряжен отрицательно,— то числом положительных ионов. Как оказалось, скорость разряда всегда несколько больше в том случае, когда электрод B заряжен отрицательно. Этот результат не зависит от знака заряда электрода A, что указывает на избыток положительных ионов в газе, прошедшем вблизи электрода A.

Разницу скоростей ионов различного знака можно определить и другим способом. Для этого к электроду A нужно приложить переменную э.д.с. такой величины, чтобы удалить из проходящего потока ионов воздуха бóльшую часть ионов. Оказывается, что полученный таким образом газ всегда заряжен положительно, что указывает на преобладание числа положительных ионов.

Мы ставили различные опыты по определению скорости ионов, образованных излучением урана: прикладывали постоянную и переменную э.д.с., пропускали воздух и между концентрическими цилиндрами, и между плоскими прямоугольными пластинами. Однако, вследствие неравномерности воздушного потока по сечению трубы, а также за счет ряда других мешающих факторов, которые нельзя было исключить, провести измерения с той точностью, которая требовалась, не удавалось. Для более точного исследования очень было бы желательно использовать метод, не связанный с потоками воздуха.

§ 15. Градиент потенциала между двумя пластинами

При движении ионов первоначальное распределение градиента потенциала между двумя пластинами изменяется.

Градиент потенциала мы измеряли двумя способами. В первом способе между двумя параллельными пластинами, одна из которых была покрыта ураном, помещалась тонкая проволока или полоска, соединенная с электрометром. Через некоторое время проволочка заряжалась до потенциала окружающего ее слоя воздуха. Во втором способе потенциал в точке определялся с помощью ртутных и водяных капель.

Для первого способа измерения мы использовали две большие цинковые пластины, расположенные в горизонтальном положении параллельно друг другу. На нижнюю пластину наносился слой окиси урана. Нижняя пластина соединялась с одним полюсом батареи напряжением 8 *в*, а верхняя пластина заземлялась. Между пластинами, параллельно их плоскостям, помещалась тонкая изолированная полоска из цинка. Эта полоска, которая была подсоединена к электрометру, постепенно приобретала потенциал измеряемой точки. Передвигая полоску между пластинами, можно было определить потенциал в различных точках.

Ниже в качестве примера приводятся полученные результаты (расстояние между пластинами 4,8 *см*; напряжение между пластинами 8 *в*):

Расстояние от верхней пластины, *см*	0	0,6	1,2	2,1	3,1	4,8
Потенциал между пластинами при наличии урана, *в*	0	2,5	3,8	5,9	7	8
Потенциал между пластинами без урана, *в*	0	1	2	3,5	5,2	8

Данные, приведенные в третьей строке, вычислялись в предположении, что без урана потенциал между пластинами изменяется линейно.

Описанный выше метод применять трудно, когда полоска расположена около пластин, так как в этом случае она очень долго заряжается до потенциала измеряемой точки.

Измерения с помощью капель ртути или воды проводятся гораздо быстрее, и они дают результаты, очень сходные с теми, что получаются первым способом. Две параллельные латунные пластины, изолированные

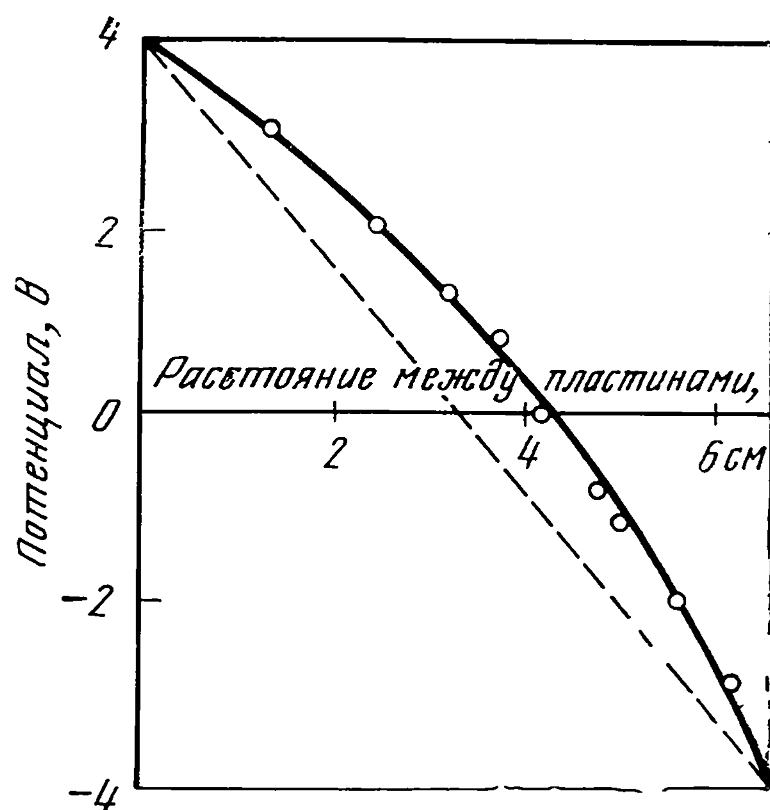


Рис. 11

одна от другой, устанавливаются вертикально. Одна пластина подсоединяется к положительному полюсу батареи, а другая — к отрицательному. Средняя точка батареи соединяется с землей. Водяная капельница подсоединяется к электрометру. Сначала мы определяли потенциал без урана. Затем одна из пластин заменялась точно такой же, но покрытой слоем соединения урана, и снова измерялся потенциал этой же точки. Таким образом, в любой точке мы определяли потенциал с ураном и без него. Приведенная на рис. 11 кривая характеризует градиент потенциала при расстоянии между пластинами 6,6 *см*. Пунктиром обозначено распределение потенциала без урана. По оси ординат отложен потенциал, а по оси абсцисс — расстояние до пластины, покрытой слоем урана.

Мы обнаружили, что градиент потенциала уменьшается около урана и увеличивается около другой пластины. При этом точка нулевого потенциала сдвигается от пластины с ураном.

Из кривых потенциала можно получить распределение свободных электрических зарядов между пластинами. Продифференцировав эту кривую один раз dv/dx, мы получим электрическую силу в каждой точке, взяв вторую производную, мы получим d^2v/dx^2, что равно $-4\pi\rho$, где ρ — объемная плотность заряда в каждой точке. Чтобы электрическое поле перераспределилось так, как на рис. 11, нужно, чтобы между пластинами был избыток ионов одного знака, распределенных между пластинами. Такой результат сразу следует из того факта, что ионизация между пластинами неоднородна вследствие поглощения излучения в газе.

Обнаружено, что при увеличении э.д.с. градиент потенциала выравнивается, приближаясь к своему невозмущенному значению. При уменьшении э.д.с. точка нулевого потенциала сдвигается от плоскости урана. Например, при расстоянии 51 *мм* между пластинами, которые заряжены до равных потенциалов противоположных знаков, плоскость нулевого потенциала находилась на расстоянии 28, 30 и 33 *мм* от урана при разности потенциалов между пластинами 16, 8 и 4 *в* соответственно.

Когда уран был заряжен положительно, точка нулевого потенциала смещалась сильнее, чем в том случае, когда уран был заряжен отрицательно. Это происходит из-за того, что положительные ионы движутся медленнее.

Наклон потенциала вблизи поверхности урана не исследовался. Отклонение потенциала между пластинами от невозмущенного очень сильно

зависит от степени ионизации газа. Очень слабая ионизация почти не влияет на распределение градиента потенциала.

Чайлд [14] и Зелени [13] показали, что под действием лучей Рентгена градиент потенциала между пластинами неоднороден. Они нашли, что ионизация между пластинами была однородной, а изменение проявлялось в резком падении поля вблизи обоих электродов. В наших опытах с излучением урана ионизация слишком мала, чтобы такой эффект можно было заметить. В данном случае поле нарушается главным образом неоднородной ионизацией и заметно такое нарушение не только вблизи электродов.

§ 16. Соотношение между током и э.д.с.

Беккерель [2], а позднее де Смолан и Битти [10] исследовали влияние величины э.д.с. на ток в газе, вызванный излучением урана. Общее соотношение между током в газе и приложенной э.д.с. очень похоже на соотношение, полученное для газов, находящихся под действием лучей Рентгена. Сначала ток возрастает почти пропорционально э.д.с. (при условии, что принимается во внимание контактная э.д.с. между металлами), затем медленнее, пока, наконец, не достигается состояние, которое можно назвать «состоянием насыщения», когда при очень большом возрастании э.д.с. ток возрастает очень слабо. Как показывают опыты, окись урана, помещенная в газ, не взаимодействующий с ней, в определенном диапазоне температур испускает постоянное излучение, интенсивность которого при обычных условиях слабо зависит от температуры. Поэтому с ураном можно делать более точные опыты, чем с лучами Рентгена, поскольку почти невозможно создать такой источник Х-лучей, который работал бы стабильно в течение сколько-нибудь длительного времени.

В описываемых здесь опытах мы пытались найти более точное соотношение между током и э.д.с., а также определить, действительно ли насыщается газ, т. е. найти, как изменяется ток при очень больших э.д.с., но, однако, не настолько больших, чтобы наступил пробой газа и возникла проводимость без излучения урана.

Чтобы исключить характеристику электрометра, мы предложили измерять ток нулевым методом, используя электрометр просто как индикатор разности потенциалов.

На рис. 12 показан общий вид прибора: A и B — две изолированные параллельные цинковые пластины; на нижнюю пластину A равномерно нанесен слой окиси урана. Она подсоединена к одному полюсу наборной батареи, другой полюс которой заземлен. Изолированная пластина B соединена с одной парой квадрантов электрометра, а другая пара подсоединена к земле. Под влиянием урана воздух между пластинами A и B начинает частично проводить электричество, и потенциал пластины B стремится сделаться равным потенциалу пластины A. Чтобы потенциал пластины B всегда был равен нулю, к ней подсоединялось очень большое ксилоловое сопротивление T, другой конец которого поддерживался

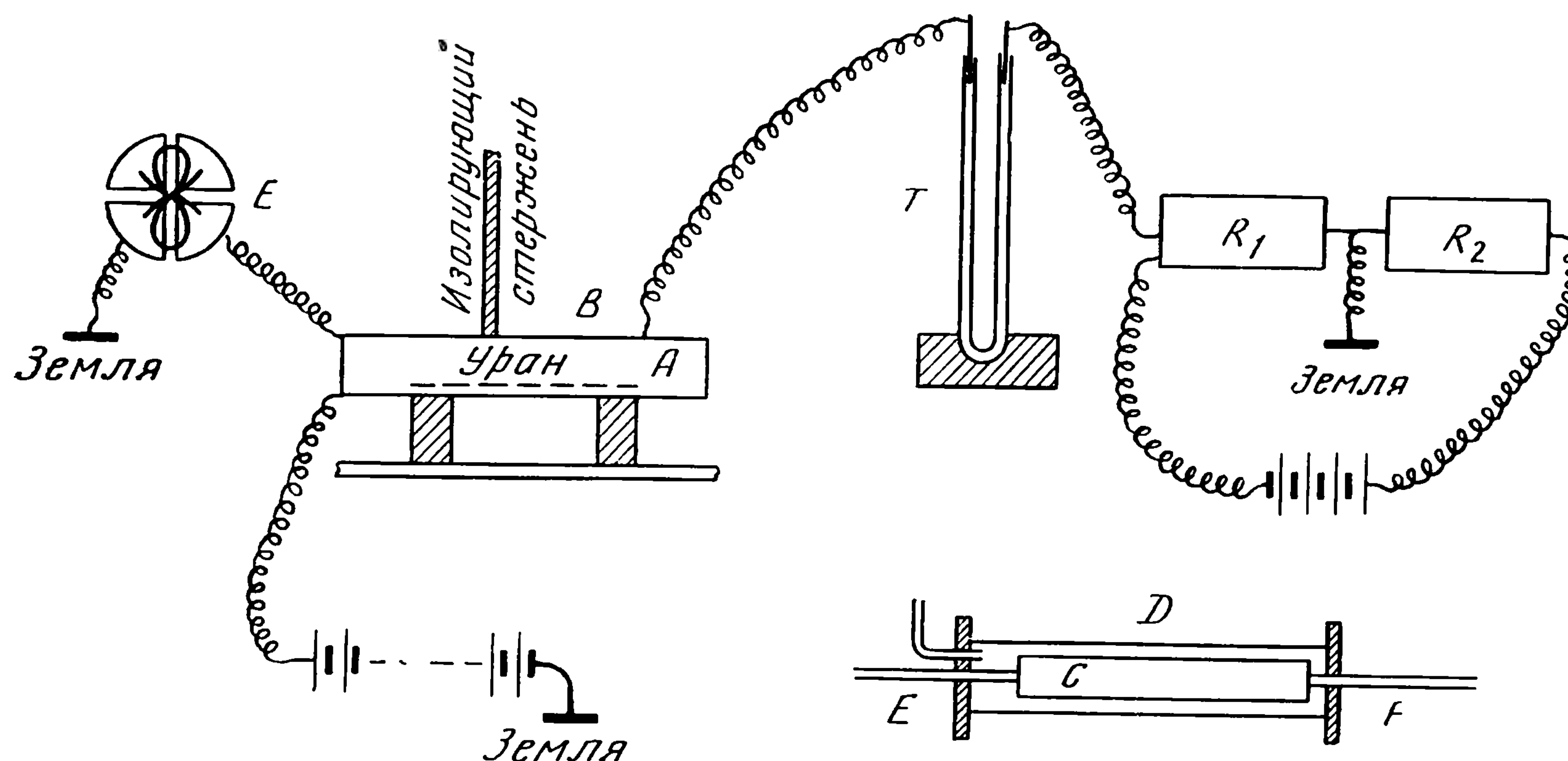


Рис. 12

при постоянном потенциале. Если количество электричества, поступающее через ксилоловое сопротивление от батареи к пластине B, равно и противоположно по знаку количеству электричества, проходящего между электродами A и B, то потенциал пластины B так и останется равным нулю. Для того чтобы регулировать потенциал на одном конце трубки с ксилолом T, батарея подсоединялась через магазины сопротивлений R_1 и R_2, а проводник, соединяющий сопротивления, заземлялся. Отношение э.д.с. e, действующей на сопротивление T, к э.д.с. батареи E равно

$$\frac{e}{E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Во время опыта величина $R_1 + R_2$ всегда оставалась постоянной, а для регулировки сопротивления плунжер с одного магазина перекидывался на другой. Таким образом, величина e была пропорциональна R_1 и общий ток в цепи электрода B (в предположении, что ксилол подчиняется закону Ома) пропорционален R_1. Если сопротивления изменяются, а электрометр остается при потенциале «земли», то ток между пластинами пропорционален R_1. Если э.д.с. слишком велика, то стрелка электрометра движется в одном направлении, а если мала, то в противоположном. При достаточно быстром разряде ток можно определить с точностью до 1%, однако при медленном разряде такой точности достигнуть невозможно, поскольку при разъединенных квадрантах нуль электрометра медленно уходит.

В табл. 12 приведены результаты опыта с окисью урана. Поверхность урана равнялась 14 *см*^{2}. Чтобы избавиться от паразитного излучения в стороны, мы поместили вокруг урана несколько свинцовых полосок, которые почти касались верхней пластины. На магазин сопротивлений подавалось напряжение 16 *в*, а полное сопротивление цепи поддерживалось равным 10 000 *ом*.

Таблица 12

Расстояние между пластинами 2,5 *см*				Расстояние между пластинами 0,5 *см*			
Разность потенциалов, *в*	Ток (R_1)	Разность потенциалов, *в*	Ток (R_1)	Разность потенциалов, *в*	Ток (R_1)	Разность потенциалов, *в*	Ток (R_1)
0,5	425	16	4230	0,125	1400	4	6200
1	825	37,5	4700	0,25	2800	8	6670
2	1570	112	5250	0,5	4300	16	6950
4	2750	375	5625	1	5250	100	7400
8	3750	800	5825	2	5650	335	7850

В таблице указана разность потенциалов между пластинами A и B. Ток, который необходим, чтобы потенциал электрометра равнялся потенциалу земли, выражается через сопротивление R_1. Экспериментально наблюдается, что закон Ома выполняется для нескольких первых отсчетов, а затем ток начинает расти медленнее напряжения, и при больших напряжениях ток растет очень слабо. Когда расстояние между пластинами было 0,5 *см*, скорость разряда при напряжении 335 *в* превышала скорость разряда при напряжении 1 *в* только на 50%.

Когда уран был покрыт алюминиевой фольгой и без нее — в обоих случаях получались в принципе одинаковые результаты. К недостаткам работы с образцами, покрытыми тонкой оловянной или алюминиевой

Таблица 13

Водород		Углекислый газ		Воздух	
Разность потенциалов, *в*	Ток	Разность потенциалов, *в*	Ток	Разность потенциалов, *в*	Ток
0	122	0	95	+1	418
—0,062	125	—0,125	205	2	451
0,125	123	0,25	255	4	495
0,25	142	0,5	305	8	533
0,5	150	1	355	36	601
1	160	2	405	108	615
2	163	4	460	216	630
4	165	8	520		
8	168	16	590		
16	172	36	705		
108	178	108	787		
216	185	216	820		

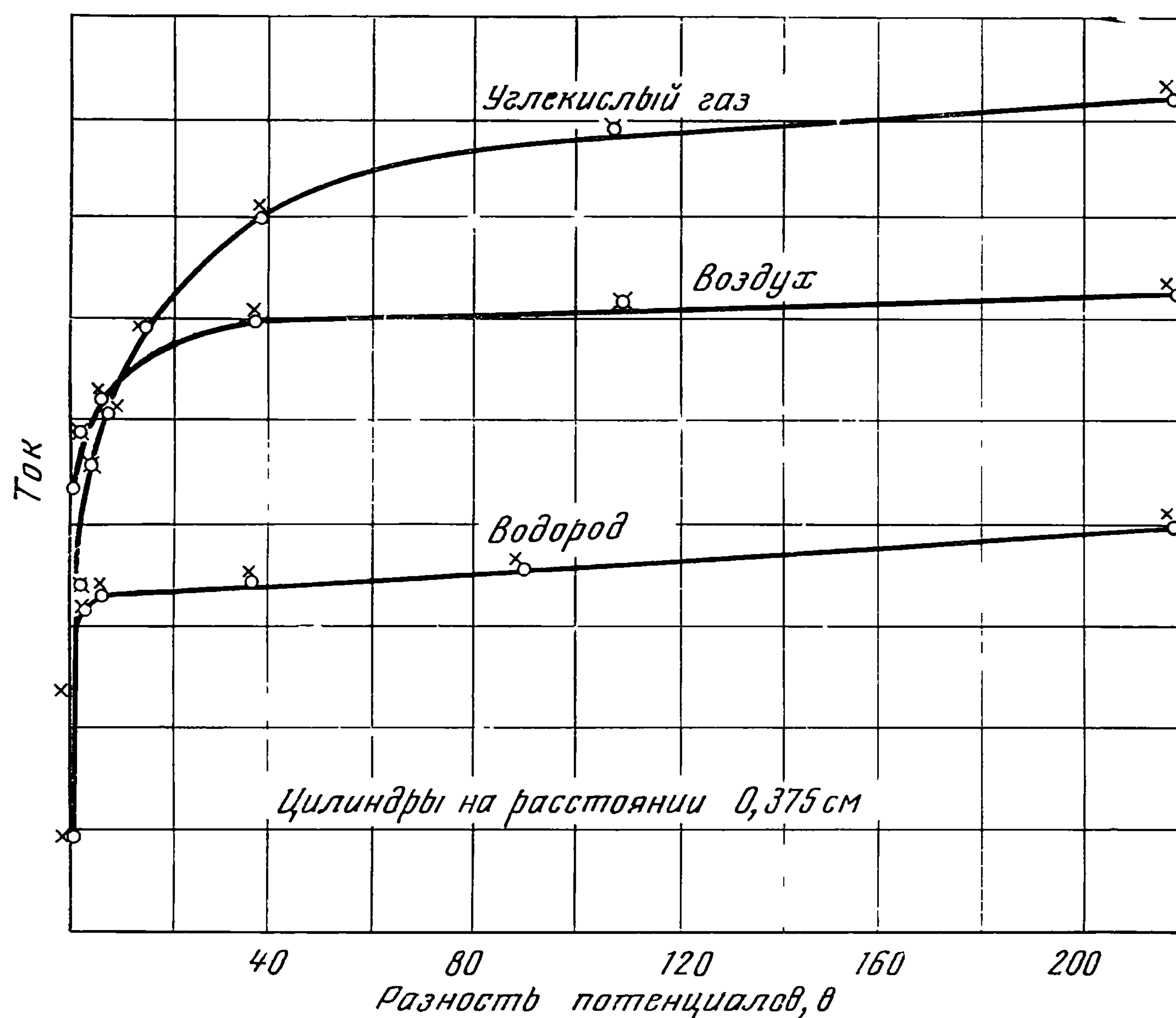


Рис. 13

фольгой, следует отнести: 1) существенное уменьшение интенсивности излучения, 2) диффузию ионов из-под оловянной фольги через небольшие отверстия в фольге и щели по ее сторонам. Недостаток работы с порошкообразным ураном заключается в том, что при больших электрических силах небольшие пылинки урана начинают попадать в пространство между пластинами и вызывают дополнительный разряд. В наших опытах скорость разряда измерялась при небольшой разности потенциалов, при котором влияние таких частиц было несущественно.

Для исследования соотношения между током и э.д.с. в различных газах мы использовали тот же метод, но в этих опытах скорость разряда измерялась между двумя концентрическими цилиндрами. Этот прибор показан на рис. 12 (нижняя часть рисунка): C и D — два концентрических латунных цилиндра диаметром 4,5 и 3,75 *см*, изолированные один от другого. Цилиндр D закрыт с двух сторон эбонитовыми заглушками, а центральный цилиндр закреплен при помощи латунных штырей, пропущенных через эбонит. Поверхность цилиндра C покрывалась равномерным слоем окиси урана. Цилиндр D был подсоединен к одному полюсу батареи, другой полюс которой заземлялся. Цилиндр C соединялся с электрометром.

В табл. 13 приведены результаты, полученные с водородом, углекислым газом и воздухом. Расстояние между цилиндрами составляло 0,375 *см*.

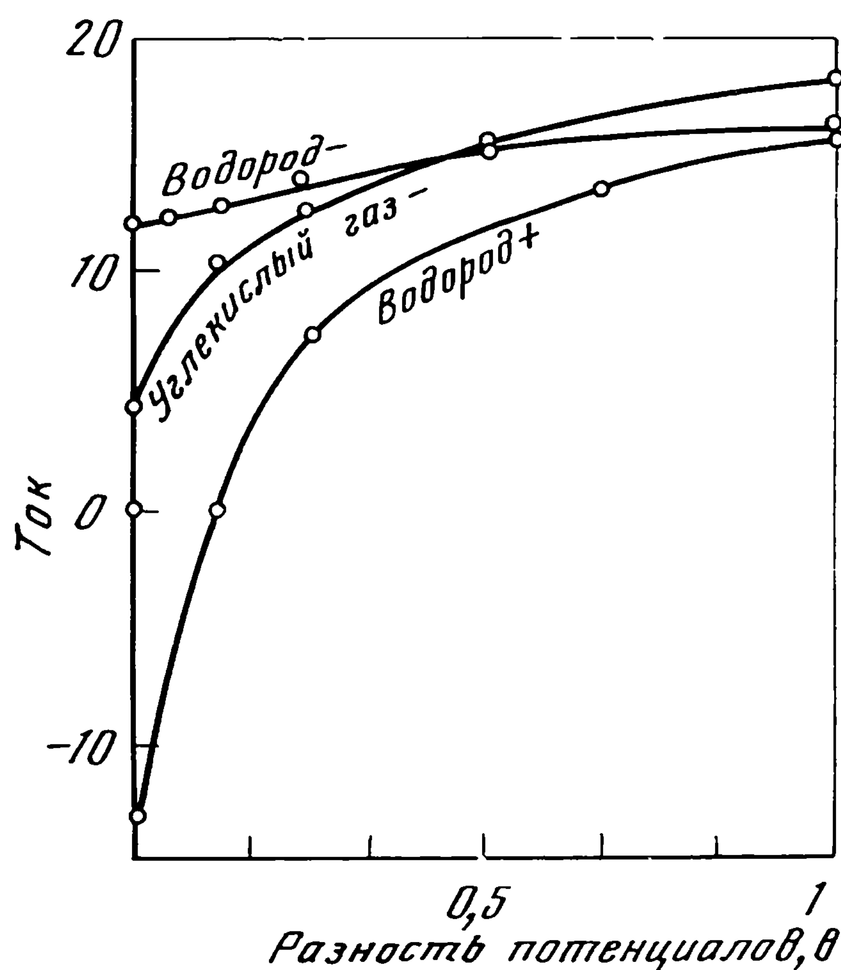


Рис. 14

Приведенные результаты изображены графически на рис. 13, где по оси ординат отложен ток в относительных единицах, а по оси абсцисс — разность потенциалов. Из приведенных в таблице результатов, полученных с водородом и углекислым газом, следует, что даже при отсутствии внешней э.д.с. между пластинами проходит ток. Причина этого кроется, по-видимому, в *контактной* разности потенциалов между поверхностью урана и поверхностью внешнего латунного цилиндра. Если внешний цилиндр заземлить, то через некоторое время внутренний цилиндр заряжается[1] до потенциала —0,12 *в*. Поэтому при небольших э.д.с. скорости разряда при положительном и отрицательном потенциалах различаются. Этот эффект отчетливо виден на рис. 14, где приведены кривые зависимости тока от э.д.с. для водорода и углекислого газа при малых напряжениях. При нулевой э.д.с. имеется некоторый ток. Если уран заряжен положительно, то при увеличении напряжения ток медленно растет; если уран заряжен отрицательно, то ток сначала имеет *отрицательное* направление, переходит через нуль и быстро растет с напряжением, и при напряжении между пластинами порядка 1 *в* положительный и отрицательный токи почти равны. На этом же рисунке приведена кривая для углекислого газа при положительном заряде урана. Видно, что в случае углекислого газа наклон кривой в начале графика больше, чем в случае водорода.

Интересно, что при э.д.с., равной нулю, ток в водороде составляет $^2/_3$ тока, протекающего между пластинами при э. д. с., равной 216 *в*. Ионы диффундируют в водороде быстрее, чем в воздухе, и на уран соответственно попадает большее число отрицательных ионов, не успевших рекомбинировать, которые отдают ему заряд.

Если облучаются две пластины из одного металла, разница между токами при отрицательном и положительном потенциале почти исчезает, но даже в этом случае через газ должен идти заметный ток, потому что отрицательные ионы диффундируют быстрее, чем положительные. Такое явление в опытах с рентгеновским излучением изучал Зелени [13].

---

[1] Это явление изучали Кельвин, Битти и де Смолан, которые показали, что под влиянием излучения урана металлы заряжаются до небольшого потенциала. Установившаяся разность потенциалов между двумя металлическими пластинами при воздействии излучения равна *контактной* разности потенциалов. Точно такое же явление изучал Перрен [11] в опытах с Х-лучами.

При больших э.д.с. никакого различия в величине тока при положительном и отрицательном заряде мы не заметили, т. е. положительно и отрицательно заряженный уран разряжается одинаково.

Что касается различных газов, то в водороде ток стремится к насыщению быстрее, чем в воздухе, а в воздухе быстрее, чем в углекислом газе. Во всех этих газах кривая зависимости тока от э.д.с. имеет резкий перегиб, но при дальнейшем увеличении э.д.с. она продолжает немного подниматься, и полного насыщения при атмосферном давлении мы никогда не наблюдали, даже при градиенте потенциала 1300 *в/см*.

В одной из предыдущих работ [4] зависимость тока от э.д.с. рассмотрена теоретически в общем случае.

При проводимости, вызванной излучением урана, эта зависимость дополнительно усложняется вследствие неоднородного характера ионизации между пластинами, что приводит к возмущению электрического поля избытком ионов одного знака.

Ионизация газа максимальна вблизи поверхности пластин и при удалении от поверхности быстро уменьшается. Таким образом, скорость рекомбинации ионов изменяется между пластинами от точки к точке, принимая максимальное значение вблизи поверхности урана.

Уравнения, из которых можно получить точное соотношение между током и э.д.с. во время разряда между двумя пластинами, на одну из которых нанесен слой урана, очень сложны, их нельзя записать в простой форме. В них нужно учитывать возмущение электрического поля между пластинами, вызванное движением ионов, изменение скорости рекомбинации в отдельных точках, а также разницу в скоростях положительных и отрицательных ионов.

Полного насыщения, т. е. состояния, при котором все образующиеся ионы достигают электродов, добиться очень трудно по следующим причинам:

1) вблизи поверхности ионы имеют большую скорость рекомбинации;

2) в газе одновременно присутствуют очень медленные и более быстрые носители;

3) на образование ионов влияет электрическое поле.

По-видимому, эффект 3) очень мал, и подтверждающих его фактов не получено даже в опытах с очень большими э.д.с. В настоящее время в одном из опытов получены результаты, из которых видно, что небольшой рост тока при сильных электрических полях происходит скорей благодаря эффекту 1), нежели эффекту 2). В этих опытах мы использовали не пластины, на одну из которых был нанесен уран, а два концентрических цилиндра, между которыми прикладывалась э.д.с. и продувался воздух. Было обнаружено, что при изменении э.д.с. от 16 до 320 *в* скорость разряда возрастает всего на 2—3%. Это гораздо меньше, чем в описанных выше опытах. Поскольку эффект 2) имеет место в обоих случаях, то, по нашему мнению, это доказывает, что присутствие медленных носителей не влияет на процесс удаления ионов из объема газа.

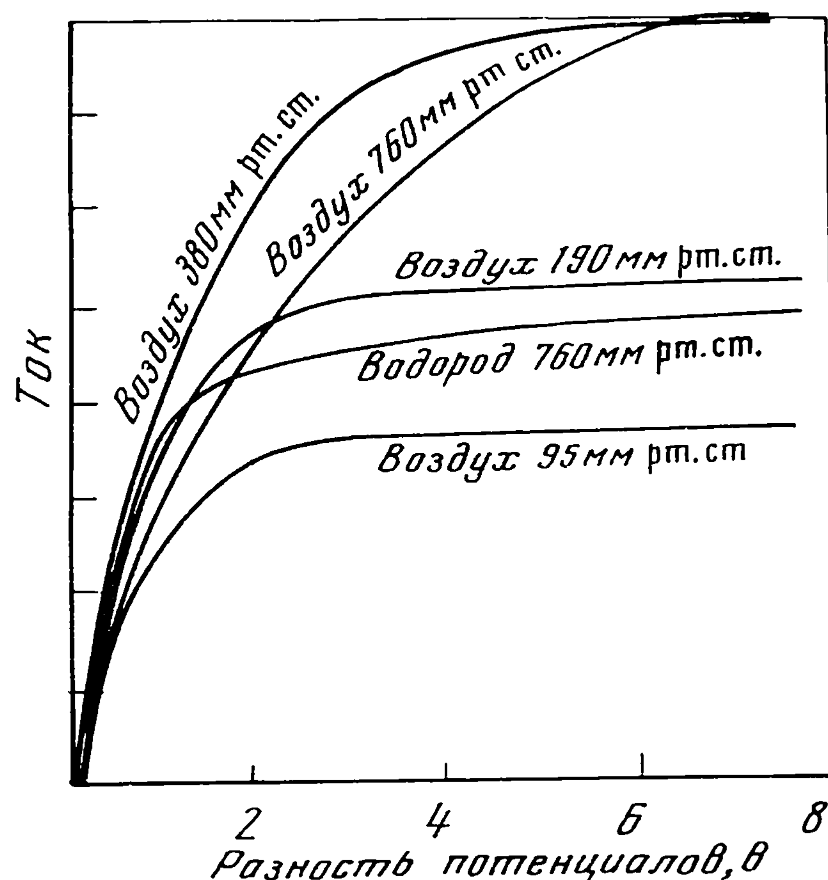


Рис. 15

Влияние давления

Мы получили также некоторые кривые, показывающие зависимость тока от э.д.с. при различных давлениях в области малых напряжений. На рис. 15 в качестве примера показаны некоторые из полученных результатов — зависимость тока от э.д.с. при давлении 760, 380 и 95 *мм* рт. ст.

Эти опыты проводились на другой установке и по другой методике, чем раньше (ср. рис. 12). В воздухонепроницаемый сосуд на расстоянии 3 *см* помещались две параллельные металлические пластины, изолированные одна от другой; на одну из них был нанесен слой окиси урана. Одна пластина была соединена с землей, другая — с электрометром. Пластина, соединенная с электрометром, заряжалась до потенциала 10 *в*. Из-за присутствия окиси урана пластина медленно разряжалась, и по скорости движения стрелки электрометра измерялся ток, соответствующий различным значениям э.д.с. Этот метод менее точен, чем предыдущий (см. рис. 12). При напряжениях в доли вольта скорость утечки не может быть определена, и поэтому на кривых рис. 15 предполагается, что ток равен нулю, когда э.д.с. равна нулю. Возможно, это не совсем верно, поскольку между пластинами имеется контактная разность потенциалов и при внешней э.д.с., равной нулю, существует небольшой начальный ток.

В целом полученные результаты показывают, что состояние насыщения в газе легче получить при небольшом давлении. Зависимость тока от э.д.с. зависит от двух факторов — скорости ионов и скорости их рекомбинации. Некоторые опыты [15] по определению скорости носителей в случае проводимости, вызванной ультрафиолетовым излучением, показали, что скорость ионов в заданном электрическом поле обратно пропорциональна давлению. По-видимому, это справедливо и для ионов, образованных лучами Рентгена; например при давлении 95 *мм* рт. ст. ионы будут двигаться в 8 раз быстрее, чем при атмосферном давлении. Зависимость скорости рекомбинации от давления еще не изучалась.

На рис. 15 приведена также кривая для водорода при атмосферном давлении, из которой видно, что водород насыщается приблизительно так же, как воздух при давлении 190 *мм* рт. ст.

§ 17. Разделение положительных и отрицательных ионов

В случае проводимости, вызванной ураном, легко создать наэлектризованный газ, если частично разделить положительные и отрицательные ионы. Битти [16] исследовал процесс образования электризации при продувании потока воздуха над поверхностью урана и обнаружил, что воздух приобретает заряд того же знака, что и поверхность урана. Его результаты легко объясняются теорией ионизации. Поскольку излучение сильно поглощается в воздухе, то газ значительно сильнее ионизован около поверхности урана, чем на некотором расстоянии от нее. Для простоты предположим, что в заземленный металлический сосуд, через который продувается поток воздуха, помещен положительно заряженный кусок урана. Под влиянием э.д.с. отрицательные ионы движутся по направлению к урану, а положительные ионы — к стенке сосуда. Поскольку у поверхности урана ионизация сильнее, то в воздухе на некотором расстоянии от урана образуется избыток положительных ионов. Часть этих ионов выдувается потоком воздуха и отдает заряд шерстяному фильтру. Отрицательных ионов в тот же промежуток времени становится меньше, поскольку э.д.с., а следовательно, и скорость носителей около урана больше, чем около внешнего цилиндра. Таким образом, выдувается избыток положительных ионов и получается положительно заряженный газ. Когда разность потенциалов между электродами возрастает, величина полученной электризации начинает зависеть от двух противоположных факторов. Скорость носителей возрастает, а число носителей, сдуваемых потоком воздуха, соответственно уменьшается. Но если газ не находится в состоянии насыщения, то число ионов, движущихся между электродами, возрастает с увеличением э.д.с., и при малых напряжениях этот эффект играет бóльшую роль, чем эффект, связанный с увеличением скорости ионов. Таким образом, с увеличением напряжения величина полученной электризации сначала растет, достигает максимума, а затем начинает уменьшаться, поскольку в насыщенном газе новые ионы при увеличении э.д.с. образоваться не могут. Этот результат был подтвержден как в опытах Битти, так и в моих опытах по разделению ионов в воздухе, которые я проводил с рентгеновским излучением. Тот факт, что получается больше положительной электризации, нежели отрицательной, объясняется бóльшей скоростью отрицательных ионов (см. § 14).

Наэлектризованный газ обладает почти теми же свойствами, что и газ, в котором проводимость вызвана рентгеновским излучением. В опытах, проводимых Битти с излучением урана, и в моих опытах с проводимостью, вызванной лучами Рентгена [9], получался обратный знак электризации, чего и следовало ожидать, поскольку использовалась иная методика. В опытах по электризации воздуха лучами Рентгена воздух продувался около заряженной проволочки. В этом случае знак получаемой электризации противоположен знаку проволочки, поскольку носители, имеющие заряд, противоположный заряду проволочки, сдуваются прежде, чем попа-

дут на нее. В опытах с ураном поток воздуха заполнял все поперечное сечение между электродами; мы показали, что в этом случае электризация должна иметь тот же знак, что и заряд урана.

§ 18. Разрядные свойства тонких сеток

В потоке воздуха, прошедшем над поверхностью урана и пропущенном через шерсть или другой материал, имеющий тонкую структуру, исчезают все следы проводимости. То же самое происходит и с воздухом, в котором проводимость вызвана рентгеновским излучением. Способность шерсти и мелких сеточек разряжать газ кажется на первый взгляд удивительной по всем данным, поскольку ионы имеют молекулярные размеры и должны, таким образом, проходить через небольшие отверстия. Следует, однако, заметить, что ионы, как и молекулы, постоянно находятся в быстром движении и, кроме того, обладают свободным зарядом. Когда ион подходит на определенное расстояние к твердому телу, он стремится приблизиться к нему, отдать заряд или осесть на его поверхность. Благодаря большой скорости диффузии ионов [17] металлическая сетка с отверстиями, гораздо бо́льшими размера иона, может эффективно разряжать наэлектризованные газы. Ниже представлены некоторые результаты опытов по исследованию разрядных свойств мелких медных сеточек. Медные сеточки имели период 0,5 *мм*, и площадь, занятая металлом, приблизительно равнялась площади отверстия. Мы перегораживали такими плотно прижатыми одна к другой сеточками трубку в сечении *A* (см. рис. 9). Скорость потока воздуха вдоль трубки поддерживалась приблизительно постоянной, и после прохождения сеток измерялась проводимость воздуха. Ниже приводится скорость разряда, обусловленного воздухом, прошедшим через различное число сеточек:

Число сеток	0	1	2	3	4	5
Скорость разряда в 1 *мин*, деления	44	32,5	26,5	19,5	10,5	6

После того как поток воздуха прошел через пять сеточек, его проводимость упала более чем в 7 раз. Мы провели несколько опытов с сеточками различного периода, и эти опыты, в принципе, дали практически одинаковые результаты. Способность разряжать газ зависит от периода сеточки, но, по-видимому, главную роль в этом играет отношение площади, занятой металлом, к площади отверстия, а не размер отверстия в сеточке. Эти опыты с медными сеточками, удаляющими из газа заряженные носители, позволяют легко объяснить, почему небольшая шерстяная пробка полностью удаляет ионы из проходящего газа. Быстрое исчезновение проводимости объясняется небольшими размерами носителей и соответственно их сильной диффузией.

§ 19. Общие замечания

Причины и происхождение излучения, непрерывно испускаемого ураном и его солями, пока еще представляют собой тайну. Из всех полученных результатов следует, что уран испускает некое излучение, которое по своему действию на газ подобно лучам Рентгена и вторичному излучению, которое испускают металлы при падении на них лучей Рентгена. Если окажется, что лучи, испускаемые ураном, не поляризуются и не преломляются, то подобие будет полным. Дж. Дж. Томсон предположил [18], что при перегруппировке частей, составляющих атом, могут происходить электрические эффекты, подобные тем, что происходят при ионизации газа. Результаты, полученные Рентгеном и Видеманом [19], показывают, что в процессе ионизации, по-видимому, испускается излучение, по своим свойствам напоминающее проникающие лучи Рентгена. Энергия, затрачиваемая на образование излучения урана, вероятно, очень мала, так что это излучение может испускаться в течение длительного времени, и при этом внутренняя энергия урана почти не уменьшается. Было изучено влияние температуры на интенсивность излучения урана. Для этих опытов мы использовали прибор, подобный описанному в § 11. Излучение полностью поглощалось в газе. Сосуд нагревался до 200°C, однако изменение скорости разряда заметно не было. Интерпретировать результаты этого опыта трудно, поскольку неизвестно, как зависит ионизация от температуры.

Никакого вторичного излучения металлов, на который было направлено излучение урана, я обнаружить не смог. Вероятно, такое излучение существует, но эффект слишком мал, чтобы его можно было измерить.

В заключение я хочу выразить мою самую большую благодарность проф. Дж. Дж. Томсону за поддержку и любезный интерес к этой работе.

Кавендишская лаборатория, 1 сентября 1898 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Becquerel A.* Compt. Rend., 1896.
2. *Becquerel A.* Compt. Rend., 1897.
3. *Russel A.* Proc. Roy. Soc., 1897.
4. *Thomson J. J.*, *Rutherford E.* Phil. Mag., November, 1896.
5. *Curie P.* Compt. Rend., July, 1898, 175.
6. *Perrin F.* Compt. Rend., 74, 455.
7. *Sagnac.* Compt. Rend., 1898.
8. *Schmidt G. C.* Wied. Ann., May, 1898.
9. *Rutherford E.* Phil. Mag., April, 1897.
10. *Beattie*, *de Smolan S.* Phil. Mag., 1897, 93, 418.
11. *Perrin F.* Compt. Rend., 73.
12. *Rutherford E.* Phil. Mag., November, 1897.
13. *Zeleny J.* Phil. Mag., July, 1898.
14. *Child E.* Wied. Ann., April, 1898, p. 152.
15. *Rutherford E.*. Proc. Cambridge. Philos. Soc., February 21, 1898.
16. *Beattie.* Phil. Mag., July, 1897, **94**, 102.
17. *Townsend J. E.* Phil. Mag., June, 1898.
18. *Thomson J. J.* Proc. Cambridge Philos. Soc., 1898, 9, pt. 8, 397.
19. *Röntgen K.* Wied. Ann., 1898, **114**; *Wiedemann E.* Z. Electrochem., 1895, **2**.

1900

4

РАДИОАКТИВНОЕ ВЕЩЕСТВО, ИСПУСКАЕМОЕ СОЕДИНЕНИЯМИ ТОРИЯ *

Как показал Шмидт [1], соединения тория испускают излучение, которое по своим электрическому и фотографическому действиям напоминает излучение урана и рентгеновское излучение. Я обнаружил, что, кроме этого обычного излучения, соединения тория непрерывно испускают какие-то радиоактивные частицы, сохраняющие радиоактивные свойства в течение нескольких минут. Эта «эманация», как мы будем называть ее для краткости, обладает способностью ионизовать окружающий газ, проходить через тонкие слои металла и особенно легко через весьма толстую бумагу.

Перед тем как представить факты, свидетельствующие о существовании радиоактивной эманации, мы опишем аномальные свойства соединений тория и сравним их со свойствами соединений урана. В большинстве опытов мы использовали окись тория, поскольку ее способность выделять эманацию выражена в большей степени, чем у других соединений; однако свойства, которыми обладает окись тория, присущи, хотя и в меньшей степени, и другим соединениям тория, а именно — нитрату, сульфату, ацетату и оксалату.

В одной из предыдущих работ [2] было показано, что излучение тория обладает большей проникающей способностью, чем излучение урана. Там же обращалось внимание на непостоянство излучения тория. Оуэнс [3] исследовал излучение соединений тория более детально. Он показал, что различные соединения испускают один и тот же тип излучения, которое, за исключением излучения из толстых слоев окиси тория, почти однородно по составу.

При исследовании излучения тория с помощью вызываемого им электрического разряда было обнаружено, что интенсивность излучения непостоянна во времени и это происходит вследствие небольшого движения воздуха в комнате. Чтобы избежать движения воздуха, прибор помещался в закрытый сосуд, и тогда интенсивность излучения оставалась практически постоянной. Такая чувствительность окиси тория к слабому движению воздуха чрезвычайно удивительна. Движение воздуха при открывании и закрывании дверей в противоположном конце той комнаты, где нахо-

---

* Philosophical Magazine, January, 1900, ser. 5, 49, 1—14.

дился прибор, часто приводило к значительному уменьшению скорости разряда. В этом отношении соединения тория отличаются от соединений урана, на которые слабое движение воздуха практически не влияет. Другая аномалия в свойствах соединений тория заключается в том, что их излучение легко проходит сквозь бумагу. Ниже для примера представлена зависимость скорости разряда между двумя параллельными пластинами, на одну из которых нанесен *толстый* слой окиси тория, от числа листов обычной писчей бумаги, которыми накрывалось радиоактивное вещество (толщина каждого листа бумаги 0,008 *см*; напряжение между пластинами 50 *в*):

Число листов бумаги	0	1	2	5	10	20
Скорость разряда	1	0,74	0,74	0,72	0,67	0,55

Здесь за единицу принята скорость разряда в опыте с окисью тория, не накрытой бумагой. Можно заметить, что первый слой бумаги снижает скорость разряда до 0,74, а последующие пять листов дают незначительный эффект. Но совсем другое наблюдается в том случае, когда мы берем *тонкий* [1] слой окиси тория. Тогда уже один лист бумаги уменьшает скорость разряда в 16 раз. На первый взгляд кажется, что окись тория испускает излучение двух типов, одно из которых сильно поглощается бумагой, а другое — только немного. Если мы исследуем излучение, испускаемое тонким слоем окиси тория, накрывая его последовательно листами тонкой бумаги, то обнаружим, что излучение приблизительно однородно (толщина бумаги — 0,0027 *см*):

Число листов бумаги	0	1	2	3
Скорость разряда	1	0,37	0,16	0,08

Скорость разряда для соли, не накрытой бумагой, принята за единицу. При испускании излучения только одного типа следует ожидать, что при последовательном добавлении листов бумаги скорость разряда (пропорциональная интенсивности излучения) уменьшится в геометрической прогрессии. Приведенные выше цифры показывают, что в нашем случае в некотором приближении наблюдалась именно такая зависимость. В опыте с толстым слоем окиси тория мы обнаружили, что при последовательном добавлении тонких бумажных листов скорость разряда постепенно уменьшается и при некоторой толщине достигает постоянного значения. Излучение, которое задерживается одним листом писчей бумаги, — того же типа, что излучение, испускаемое тонким слоем окиси.

При продувании слабого потока воздуха между измерительными пластинами скорость разряда от толстого слоя окиси тория сильно падает. Это явление в значительной мере не зависит от э.д.с., приложенной между

---

[1] Для получения тонкого слоя на пластинку насыпалась с помощью мелкой металлической сеточки окись в виде мелкого порошка, чтобы пластинка была покрыта очень тонким слоем. Толстым слоем считается слой окиси толщиной свыше 1 *мм*.

пластинами. Если провести в тех же условиях опыт с ураном, то скорость разряда практически не изменяется. В опыте с тонким слоем окиси скорость разряда уменьшается незначительно; в опыте же с толстым слоем скорость разряда падает больше чем в 3 раза. Если слой окиси тория накрыть двумя листами писчей бумаги, то при непрерывном продувании слабого потока воздуха из баллона или с помощью мехов скорость разряда может упасть больше чем в 20 раз.

Явления, происходящие с соединениями тория, можно полностью объяснить, если предположить, что, кроме обычного излучения, из массы активного вещества выделяются в большом количестве радиоактивные частицы. Эта эманация может проходить через достаточно толстую бумагу. Радиоактивные частицы, испускаемые соединениями тория, постепенно диффундируют в окружающий газ и становятся в нем центрами ионизации. Тот факт, что в опыте с тонким слоем окиси тория движение воздуха мало сказывается на результатах, объясняется тем, что в этом случае скорость разряда от обычного излучения больше скорости разряда от эманации. Для толстого слоя окиси тория скорость разряда от обычного излучения практически та же, что и для тонкого слоя, так как излучение может пройти только через тонкий слой соли. С другой стороны, эманация может продиффундировать из глубины соединения через слой толщиной в несколько миллиметров, и благодаря этому скорость разряда становится гораздо больше, чем в случае только одного обычного излучения.

Теория «эманации» позволяет легко объяснить влияние слабого движения воздуха. Поскольку электрическое поле не влияет на радиоактивные частицы, то даже едва заметное движение воздуха, если оно продолжается достаточно долго, выносит много радиоактивных центров из пространства между пластинами. Немного ниже мы покажем, что эманация ионизует окружающий газ в течение нескольких минут, так что, удалив эти частицы из пространства между пластинами, мы уменьшаем скорость разряда.

Продолжительность радиоактивного действия эманации

Эманация постепенно теряет свою способность к радиоактивности. Чтобы определить скорость распада интенсивности излучения радиоактивных частиц, испускаемых окисью тория, мы применили следующую методику.

В узкий прямоугольный пакет A, сложенный из двух листов писчей бумаги, помещался толстый слой окиси тория (рис. 1). Бумага почти полностью поглощала обычное излучение, но пропускала эманацию. Завернутый таким образом торий помещался в длинную металлическую трубу B. Одни конец этой трубы соединялся с большим изолированным от земли цилиндрическим сосудом C, в днище которого было проделано несколько отверстий для прохода воздуха. Внутри сосуда C был закреплен изолированный электрод D, соединенный с одной парой квадрантов

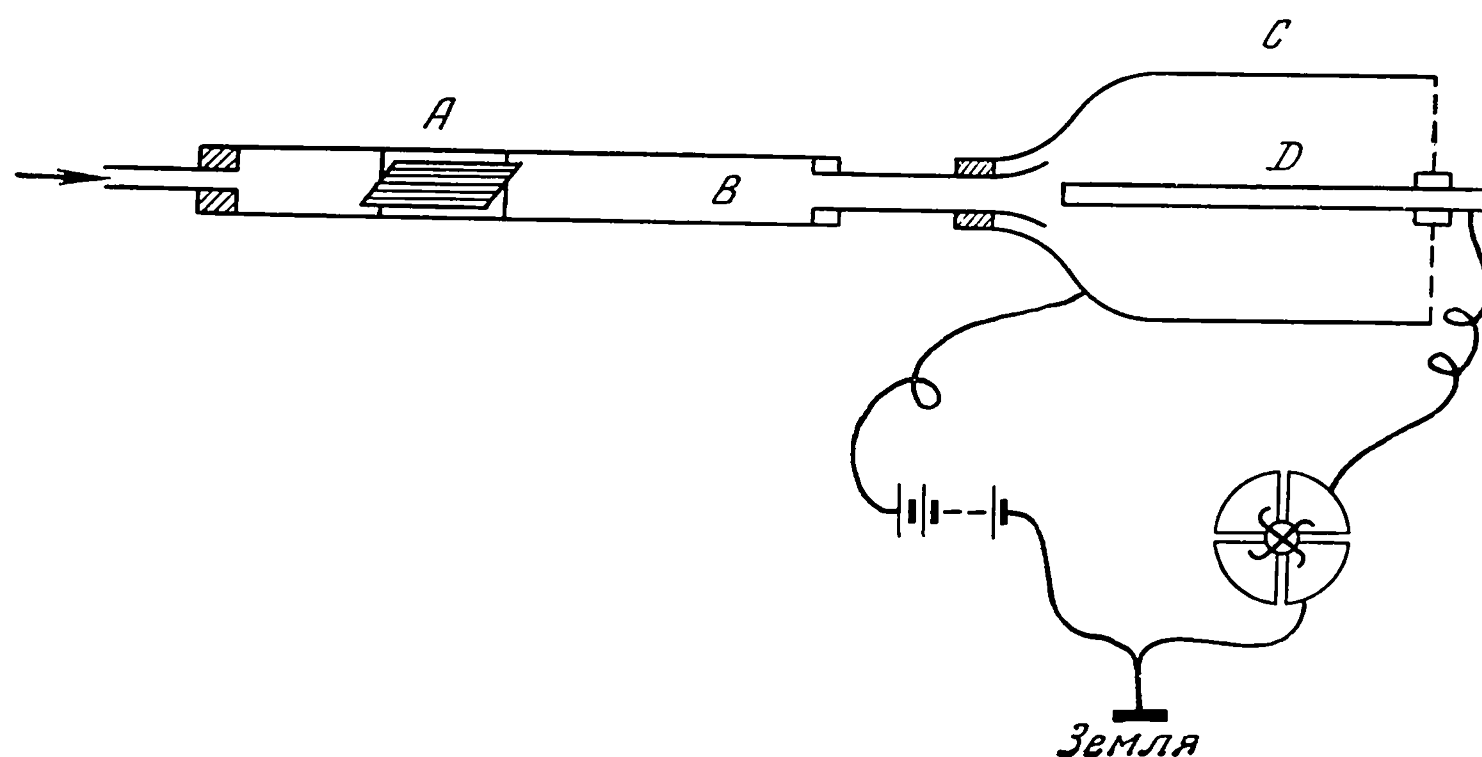


Рис. 1

электрометра Томсона. Цилиндр C подсоединялся к полюсу батареи напряжением 100 *в*, другой полюс которой был заземлен.

Через прибор с помощью вентилятора или из баллона продувался с небольшой скоростью поток воздуха, на пути которого помещался шерстяной фильтр, очищающий его от пыли. При прохождении над окисью тория поток воздуха захватывал с ее поверхности радиоактивные частицы, которые постепенно выносились в большой цилиндр C. Пока радиоактивные частицы не попали в объем C, стрелка электрометра была неподвижной. Вследствие ионизации газа в цилиндре радиоактивными частицами между электродами C и D начинал проходить ток. При изменении полярности батареи, подсоединяемой к цилиндру C, величина тока не менялась. Если воздух продувался в течение нескольких минут, то ток между электродами C и D стремился к некоторому постоянному значению. Затем поток воздуха перекрывался и через равные промежутки времени между C и D измерялась скорость разряда. Обнаружено, что ток между электродами C и D существует более 10 *мин*.

Ниже приведены результаты серии наблюдений (разность потенциалов 100 *в*):

Время, *сек*	0	28	62	118	155	210	272	360
Ток	1	0,69	0,51	0,23	0,14	0,067	0,041	0,018

Кривая A на рис. 2 отражает соотношение между током, протекающим через газ, и временем. За единицу принята величина тока в тот момент, когда перекрывался поток воздуха. Видно, что ток через газ уменьшается со временем в геометрической прогрессии. С помощью теории ионизации легко показать, что ток через газ пропорционален интенсивности излучения испускаемого радиоактивными частицами. Таким образом, мы видим, что интенсивность излучения, испускаемого радиоактивными частицами, падает со временем в геометрической прогрессии. Результаты измерений

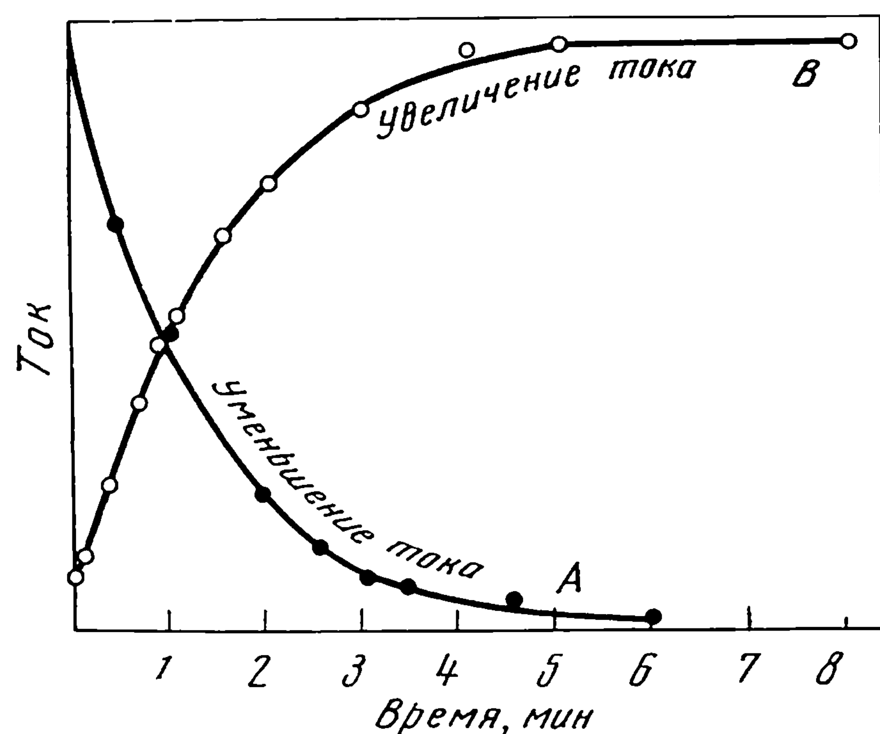


Рис. 2

показывают, что интенсивность излучения падает вдвое за время порядка *одной минуты*. Через 10 *мин* скорость разряда, обусловленная эманацией, становится очень малой, и ее невозможно измерить.

Если ионизация газа вызывается соединениями урана, то при тех же напряжениях проводимость сохраняется только в течение долей секунды.

Скорость уменьшения активности излучения не зависит от величины э.д.с., прикладываемой к газу. Это говорит о том, что электрическое поле не разрушает радиоактивных частиц. Обнаружено, что независимо от того, действовала ли э.д.с постоянно или ее прикладывали только на время измерений, ток через газ после перекрытия потока воздуха имел одно и то же значение. Ток через газ зависит от э.д.с. так же, как и в случае проводимости, вызванной лучами Рентгена. Сначала ток увеличивается почти пропорционально э.д.с., а затем стремится к «насыщению».

Продолжительность радиоактивности измерялась и другим методом. В длинный латунный цилиндр длиной более 200 *см* помещался бумажный пакет с окисью тория. Над окисью тория вдоль трубы продувался с небольшой скоростью (около 2 *см/сек*) поток воздуха, который затем проходил между двумя концентрическими цилиндрами. После того как воздух продувался по трубе достаточно долго и наступало некое равновесное состояние, между двумя концентрическими цилиндрами измерялась скорость разряда (при разности потенциалов 270 *в*). Скорость разряда измерялась при перемещении окиси тория вдоль трубы. Зная скорость потока воздуха в трубе, можно определить время, которое требуется, чтобы радиоактивные частицы попали в измерительный прибор. Этим методом мы определили, что скорость уменьшения активности излучения приблизительно равна скорости уменьшения, определенной первым методом, т. е. интенсивность падает вдвое за время около 1 *мин*.

В опытах на этом приборе мы пытались также определить, движутся ли радиоактивные частицы под действием электрического поля. В опытах по влиянию потока воздуха на скорость разряда предполагается, естественно, что некоторые ионы столь велики, что они движутся чрезвычайно медленно даже в очень сильных полях. Полученные результаты показывают, что в поле с градиентом потенциала 1 *в/см* частицы движутся со скоростью не больше 1/100 000 *см/сек*, а возможно, не движутся вовсе. При вдувании эманации в индуктор мы не обнаружили никаких признаков того, что эманация имеет заряд, т. е. эманация не имеет заряда и электрическое поле на нее заметного действия не оказывает.

Свойства эманации

Эманация проходит через шерстяную пробку, не теряя радиоактивных свойств. Эти свойства не исчезают и после того, как эманация прошла через горячую или холодную воду или же через серную кислоту различной концентрации. В этом отношении эманация напоминает обычный газ. С другой стороны, ионы теряют заряд при прохождении как через шерстяную пробку, так и через воду.

По своим фотографическим и электрическим действиям эманация похожа на уран. Она способна ионизовать окружающий газ и действует в темноте на фотопластинку при экспозиции в несколько дней. Рассел [4] показал, что перекись водорода оказывает активное действие на фотопластинку в любой оболочке — металлической, бумажной и др. Очевидно, перекись водорода может проходить через слои некоторых веществ, и в этом отношении эманация напоминает перекись. Однако перекись водорода не ионизует окружающий газ. Она действует на фотопластинки чисто химически, тогда как в случае эманации фотографическим и ионизационным действием обладает не сама эманация, а ее излучение.

Радиоактивная эманация проходит через любой металл, если слой металла достаточно тонок. Чтобы удостовериться, что эманация проходит через исследуемый материал, а не диффундирует вокруг краев, мы помещали радиоактивное вещество в квадратный паз, сделанный в толстой свинцовой плите. Чтобы исключить обычное излучение, этот паз плотно заклеивался двумя слоями бумаги. Затем с помощью воска к свинцовой плите плотно прикреплялся исследуемый материал.

Результаты исследования различных материалов можно проиллюстрировать следующими цифрами. Скорость разряда, вызванного эманацией, измерялась между двумя параллельными пластинами, расположенными на расстоянии 4 *см*:

алюминиевая фольга толщиной 0,0008 *см*:

Число слоев	0	1	3	6
Скорость разряда	1	0,66	0,42	0,16

картон толщиной 0,08 *см*:

Число слоев	0	1	2
Скорость разряда	1	0,40	0,21

Эманация легко проходит через несколько сложенных вместе золотых и серебряных листков. Совершенно непрозрачной для эманации оказалась слюдяная пластинка толщиной 0,006 *см*.

Когда мы помещали в закрытый сосуд толстый слой окиси тория, покрытой несколькими слоями бумаги, то скорость разряда, вызванного эманацией, вначале была невелика, а затем постепенно возрастала и через несколько минут достигала равновесного значения.

Этого и следовало ожидать, поскольку эманация способна только медленно диффундировать через бумагу и окружающий воздух. Равновесное состояние достигается тогда, когда уменьшение интенсивности, вызванное постепенным распадом радиоактивности эманации, компенсируется увеличением количества радиоактивных центров, поступающих из соединения тория.

Пусть n — число ионов, образованных радиоактивными частицами между пластинами в 1 *сек*; q — число ионов, образуемых за 1 *сек* эманацией, диффундирующей из тория.

Скорость изменения количества ионов в любой момент времени определяется уравнением

$$\frac{dn}{dt} = q - \lambda n,$$

где λ — константа.

Результаты, приведенные выше, показывают, что скорость уменьшения числа ионов пропорциональна их общему числу.

Решив это уравнение, получим

$$\ln(q - \lambda n) = -\lambda t + A,$$

где A — константа.

При

$$t = 0, \quad n = 0,$$
$$A = \ln q.$$

Таким образом,

$$n = \frac{q}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}).$$

При большой разности потенциалов между измерительными пластинами ток через газ в любой момент времени равен $i = ne$, где e — заряд иона.

В равновесном состоянии $dn/dt = 0$; максимальное число ионов N, образуемых радиоактивными частицами между пластинами за 1 *сек*, дается выражением

$$N = \frac{q}{\lambda},$$

а максимальный ток I — выражением

$$I = Ne.$$

Отсюда

$$\frac{i}{I} = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Таким образом, ток возрастает по тому же закону, что в цепи с постоянной индуктивностью.

Этот результат подтверждается опытом, в котором исследовалось изменение тока между двумя концентрическими цилиндрами. Внутри цилиндра помещалась завернутая в бумагу окись тория. Для удаления образующейся эманации между цилиндрами продувался воздух. Затем поток воздуха перекрывался и с помощью электрометра измерялся ток между двумя цилиндрами. Измерения проводились через последовательные промежутки времени сразу после перекрытия потока. Ниже приведены полученные результаты (длина цилиндра 30 *см*; внутренний диаметр внешнего цилиндра 5,5 *см*; внешний диаметр внутреннего цилиндра 0,8 *см*; напряжение между цилиндрами 100 *в*):

Время, *сек*	0	7,5	23	40	53	67	96	125	184	244	304	484
Ток в 1 *сек*, деления шкалы	2,4	3,3	6,5	10	12,5	13,8	17,1	19,4	22,7	25,3	25,6	25,6

Эти результаты представлены на рис. 2 в виде кривой B; по оси ординат отложен ток, а по оси абсцисс — время. Видно, что кривая возрастания тока похожа по виду на кривую для электрического тока в цепи с постоянной индуктивностью. Ток достигает половины максимального значения через 1 *мин* после перекрытия потока воздуха. Этот результат согласуется с выписанным выше уравнением, где $e^{-\lambda t} = {}^1/_2$ при $t = 60$ *сек* (см. выше). В момент перекрытия воздуха имеется некоторый ток, поскольку большинство ионов, образованных эманацией, попадает на электроды раньше, чем поток воздуха успеет вынести их из цилиндров.

Когда источник эманации удален, то $q = 0$ и уменьшение числа ионов, образованных эманацией, описывается уравнением

$$\frac{dn}{dt} = -\lambda n.$$

Если $n = N$, когда $t = 0$, то легко видеть, что

$$\frac{n}{N} = e^{-\lambda t},$$

или

$$\frac{i}{I} = e^{-\lambda t},$$

т. е. ток через газ уменьшается в геометрической прогрессии. Через 20 *мин* ток через газ составляет около одной миллионной первоначального значения.

Мы показали, что $e^{-\lambda t} = {}^1/_2$ при $t = 60$ *сек*, поэтому

$$\lambda = \frac{1}{86},$$

$$N = \frac{q}{\lambda} = 86q,$$

или в равновесном состоянии общее число образующихся за 1 *сек* ионов в 86 раз больше количества ионов, образуемых за 1 *сек* эманацией, испускаемой торием.

Количество эманации, испускаемой окисью тория, увеличивается с толщиной слоя. Когда мы нанесли 1 *г* окиси тория на поверхность площадью 25 $см^2$, то скорость разряда от обычного излучения практически достигла максимума. Скорость разряда от эманации в этом случае была мала. Когда на ту же площадь нанесли 9 *г* окиси, то скорость разряда от эманации достигла половины максимального значения, которое в этом случае было в 4 раза больше, чем скорость разряда от обычного излучения. Таким образом, эманация сохраняет радиоактивные свойства после диффузии сквозь слой соединения тория толщиной несколько миллиметров.

Эманация выделяется из тория независимо от того, какой газ его окружает. Воздух, кислород, водород и углекислый газ дают очень похожие результаты.

Скорость разряда от эманации уменьшается при понижении давления воздуха, окружающего образец. Мы сделали всего несколько таких опытов, но полученные результаты указывают на единую скорость выделения эманации при любом давлении; поскольку, однако, ионизация газа прямо пропорциональна давлению, скорость разряда при понижении давления уменьшается.

Как показали опыты, количество эманации не зависит также и от степени насыщенности воздуха водяными парами.

Среди всех радиоактивных веществ только торий может испускать радиоактивные частицы в достаточном количестве. Этим свойством в заметной степени обладают все соединения тория, но особенно ярко оно выражено у окиси. Мы работали с двумя различными образцами окиси тория, которые мы получили от Шухарта (Германия) и от Эймера и Аменда из Нью-Йорка. Последние приготовляли окись, прокаливая нитрат тория, полученный из монацитового песка.

Скорость разряда, вызванного эманацией, при переходе нитрата тория в окись возрастает в несколько раз; одновременно в той же самой пропорции увеличивается и скорость разряда от обычного излучения, испускаемого торием. Превращение нитрата в окись происходит при нагревании ниже температуры красного каления. Если образец нагревался до белого каления в муфельной печи, то количество эманации непрерывно уменьшалось и после прогрева в течение 4 *час* скорость разряда от эманации составляла всего 1/20 скорости разряда сразу после перехода нитрата в окись.

Аналогично нитрату ведут себя оксалат и сульфат тория; однако они выделяют значительное количество эманации только после продолжительного нагрева.

Для объяснения происхождения и природы эманации естественно предложить две гипотезы:

1. Эманация представляет собой мелкую пыль радиоактивного вещества, выделяемую соединениями тория.

2. Эманация представляет собой пар, выделяемый соединениями тория.

Сильным возражением против того, что эманация представляет собой пыль, служит ее способность проходить через металлы, толстые слои бумаги и шерстяные пробки. Для выяснения этого вопроса были, однако, поставлены специальные опыты. Опыты Эйкена и Вильсона [5] показали, что обычный воздух можно полностью очистить от пыли, если многократно производить небольшие расширения воздуха над водной поверхностью. Частицы пыли служат при этом центрами образования капель, которые затем покидают газ под действием силы тяжести.

Мы провели такой опыт с окисью тория, помещенной в сосуд. Окись тория была помещена в бумажный цилиндр, через который могла проходить эманация. Однако после многократного расширения воздуха никакого тумана не образовалось, и, следовательно, частицы эманации слишком малы и служить центрами конденсации водяного пара не могут. Мы можем, следовательно, заключить, что эманация, как видно из этого опыта. не является пылью окиси тория.

Нам кажется, что представляло бы интерес исследовать поведение эманации при большем разрежении и более быстром расширении воздуха, как было сделано Вильсоном [6] в опытах по исследованию ионов как центров конденсации.

Эманация, возможно, представляет собой пар тория. Есть все основания считать, что все металлы и другие вещества в той или иной степени могут испаряться. Если радиоактивные свойства тория определяются молекулами, то мы могли бы ожидать, что и пар тория будет радиоактивным в течение небольшого времени, но эта радиоактивность будет уменьшаться вследствие сильного излучения энергии. Некоторую информацию об этом процессе можно, вероятно, получить, если изменить скорость диффузии эманации в газах. Есть надежда, что из такого опыта можно получить приближенную оценку для молекулярного веса эманации.

Мы провели ряд опытов с целью выяснить, может ли эманация тория заметно изменить давление газа в откачанной трубке. Окись тория помещалась в пузырек, соединенный со спектроскопической трубкой Плюккера. Трубка откачивалась, и давление измерялось манометром Мак-Леода. Пузырек с окисью тория отсоединялся от основной трубки с помощью крана. Трубка Плюккера заполнялась газом и затем снова откачивалась до того же давления. Соединение этих двух объемов вместе никакой разницы давлений ни по манометру, ни по разряду от индукционной катушки не дало. Спектр газа также не изменился.

Из опытов, которые проводятся в настоящее время, следует, что эманация обладает чрезвычайно удивительными свойствами. Я обнаружил, что положительные ионы, образуемые эманацией в газе, обладают способностью создавать радиоактивность во всех веществах, на которые

они попадают. Эта способность вызывать вторичную радиоактивность сохраняется в течение нескольких дней. Ее излучение имеет бо́льшую проникающую способность, чем излучение тория или урана. Таким образом, эманация соединений тория имеет свойства, которыми не обладает сам торий. Более полно полученные результаты будут опубликованы в следующих сообщениях.

Мак-Гиллский университет, Монреаль
13 сентября 1899 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Schmidt G. C.* Wied. Annal., May, 1898.
2. *Rutherford E.* Phil. Mag., January, 1899, **109.**
3. *Owens R. B.* Phil. Mag., October, 1899, 360.
4. *Russell A.* Proc. Roy. Soc., 1897.
5. *Aitken, Wilson C. T. R.* Trans. Roy. Soc., 1897.
6. *Wilson C. T. R.* Phil. Trans. Roy. Soc., 1897, 439.

РАДИОАКТИВНОСТЬ, ОБРАЗУЮЩАЯСЯ В ВЕЩЕСТВАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОЕДИНЕНИЙ ТОРИЯ *

Соединения тория обладают способностью в определенных условиях вызывать в любом твердом веществе, расположенном рядом с ними, радиоактивность, которая со временем исчезает. Становясь радиоактивными, вещества ведут себя так, как будто на их поверхность нанесен слой радиоактивного вещества типа урана или тория. Эту радиоактивность можно обнаружить по ее фотографическому и электрическому эффектам. Однако в отличие от излучения тория или урана, которые постоянны в течение длительного времени, интенсивность возбужденного излучения постепенно уменьшается. После того как вещество изолировано от тория, интенсивность излучения за 8 *час* излучения падает приблизительно наполовину. Испускаемое излучение имеет большую проникающую способность, нежели аналогичное излучение урана и тория, а также излучение радиоактивных веществ из урановой смоляной обманки — радия [1] и полония [2].

Впервые наше внимание к этому явлению, которое можно назвать «возбужденной радиоактивностью», было привлечено тем фактом, что у таких хороших изоляторов, как эбонит и парафин, в присутствии соединений тория явно ухудшаются изоляционные свойства.

Прибор, который применялся в первых опытах, показан на рис. 1. Две изолированные пластины B и C были расположены параллельно одна другой. В квадратном углублении LM, сделанном в пластине C, помещался слой окиси тория, закрытый несколькими слоями писчей бумаги. Все устройство помещалось в свинцовый сосуд A, имевший отверстие, через которое можно было передвигать пластину C. Заштрихованные на рисунке детали представляют собой изоляторы. Пластина C была подсоединена к положительному полюсу батареи напряжением 50 *в*, второй конец которой был заземлен. Пластина B соединялась с одной парой квадрантов прецезионного электрометра Томсона, имеющего устройство настройки и шкалу. Другая пара квадрантов электрометра заземлялась.

Если пластина B изолирована, то ток проводимости от пластины C по изоляторам идти не может, поскольку мешает заземленный сосуд. Если пластину C, на которой находится торий, убрать, заменив ее аналогичной латунной пластиной, то стрелка электрометра при этом заметно

---

* Philosophical Magazine, 1900, ser. 5, 49, February. 161—192,

не передвигается. Однако если пластину *C* с нанесенным на ней слоем окиси тория поместить на несколько часов в сосуд, зарядив при этом пластину *B* отрицательно, то, заменив пластину *C* неактивной металлической пластиной, можно по движению стрелки электрометра установить, когда пластина *B* приобретет положительный заряд. После изменения полярности батареи ток течет в противоположном направлении, но величина его остается неизменной. С течением времени ток между пластинами постепенно уменьшается, и через несколько дней его уже невозможно заметить. Чтобы повторить опыт, нужно сменить окись тория.

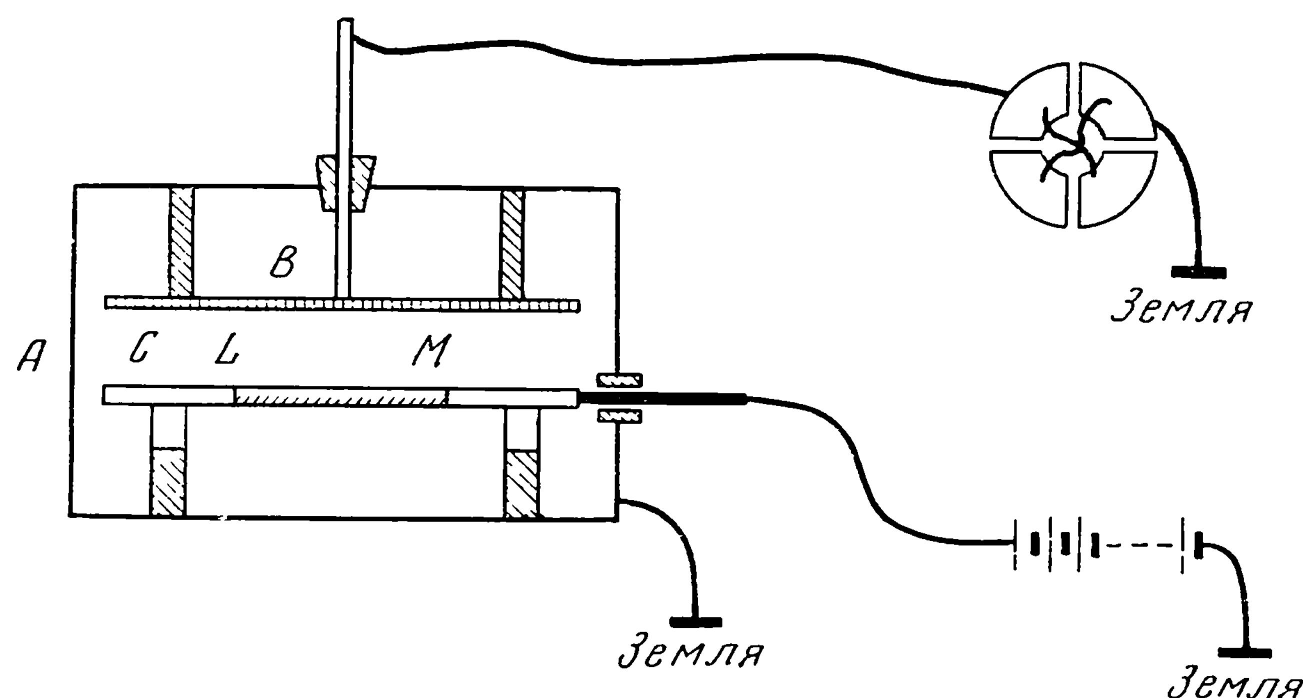


Рис. 1

Сначала мы предполагали, что из-под бумаги в сосуд могут проникнуть частицы пыли окиси тория, которые каким-то образом прилипают к верхней пластине. Осмотр поверхности пластины *B* показал, что на ней нет следов окиси тория, однако пластина вызывала проводимость окружающего воздуха так, как будто была покрыта толстым слоем радиоактивного вещества. Если поверхность пластины тщательно протереть наждачной шкуркой, то ее способность излучать почти пропадает. Мы обнаружили, что пластина *B* становится активной, если даже окись тория покрыть 30 слоями писчей бумаги, плотно склеенной воском, чтобы предотвратить проникновение частичек пыли.

Если пластину *C* зарядить отрицательно, а пластину *B* — положительно, то пластина *B* теряет радиоактивность, зато активным становится верхний слой бумаги, закрывающий торий, причем активным в той же степени, что и пластина *B* в предыдущем случае. Таким образом, в обоих случаях активной становится отрицательно заряженная поверхность.

Все исследованные соединения тория обладают способностью вызывать радиоактивность в веществах. Наибольший эффект, однако, дает окись тория, и поэтому в большинстве опытов использовалась именно она.

Соединения тория мы получали от Эймера и Аменда из Нью-Йорка. Окись получалась прокаливанием нитрата, который был выделен из монацитового песка. Если окись нагревать в платиновом тигле до белого каления и держать ее так в течение нескольких часов, то она практически утрачивает способность возбуждать в веществах радиоактивность.

Сравнение интенсивности излучения

Интенсивность излучения, которое возбуждается в веществах описанным выше способом, измерялась во всех случаях электрическим методом. При этом для удобства измерений радиоактивность обычно возбуждалась в плоских пластинах или круговых цилиндрах.

Измерительный прибор, который применялся в опытах с плоскими пластинами, был аналогичен изображенному на рис. 1. Латунные пластины B и C помещались на расстоянии 5 *см* одна от другой, и разность потенциалов между ними составляла 50 *в*. Мы считали, что ток между пластинами, измеряемый по скорости движения стрелки электрометра, пропорционален интенсивности излучения у поверхности. В опытах с радиоактивными цилиндрами активный цилиндр помещался концентрически внутри цилиндра большего радиуса. Мерой интенсивности излучения у поверхности служил ток при разности потенциалов 50 *в*.

Для опытов, длившихся в некоторых случаях несколько дней или даже недель, был необходим электрометр, обладавший одинаковой чувствительностью при всех измерениях. Частично мы добивались этого с помощью устройства настройки Томсона и градуировочной шкалы, которая прилагалась к электрометру. При малых отклонениях от стандартной чувствительности величина тока корректировалась по отклонению электрометра, подсоединенного к ячейке Кларка.

Поскольку в дальнейшем мы будем сравнивать излучения от радиоактивных плоскостей и цилиндров, то сейчас мы обсудим некоторые теоретические соотношения между интенсивностью излучения, площадью активной поверхности и максимальным током через газ.

Рассмотрим два случая:

1. Излучает плоская поверхность, а ток через газ измеряется между двумя параллельными пластинами.

2. Излучает цилиндр, а ток измеряется между двумя концентрическими цилиндрами.

Случай 1. Сначала рассмотрим случай, когда однородная радиоактивная пластина C площадью S расположена между двумя протяженными параллельными пластинами A и B (рис. 2, *а*).

Предположим, что размеры пластины C гораздо больше расстояния d между C и A и излучение во всех точках ее поверхности одинаково. Излучение, проходящее через газ, ионизует его, и ионы под действием электрического поля попадают на пластины A и C.

При прохождении слоя газа интенсивность излучения уменьшается, так как для ионизации газа требуется энергия.

Пусть излучение однородно по составу, λ — коэффициент поглощения излучения в газе, I_0 — интенсивность излучения у поверхности пластины. Поскольку размеры пластины много больше расстояния d, то можно считать, что на равном расстоянии от пластины C интенсивность излучения примерно одинакова повсюду. Вследствие поглощения в газе интенсивность I на расстоянии x от активной пластины определяется выражением

$$I = I_0 e^{-\lambda x}.$$

Пусть dn — число ионов, образующихся за 1 *сек* в промежутке от x до $x + dx$ между плоскостями, параллельными поверхности C.

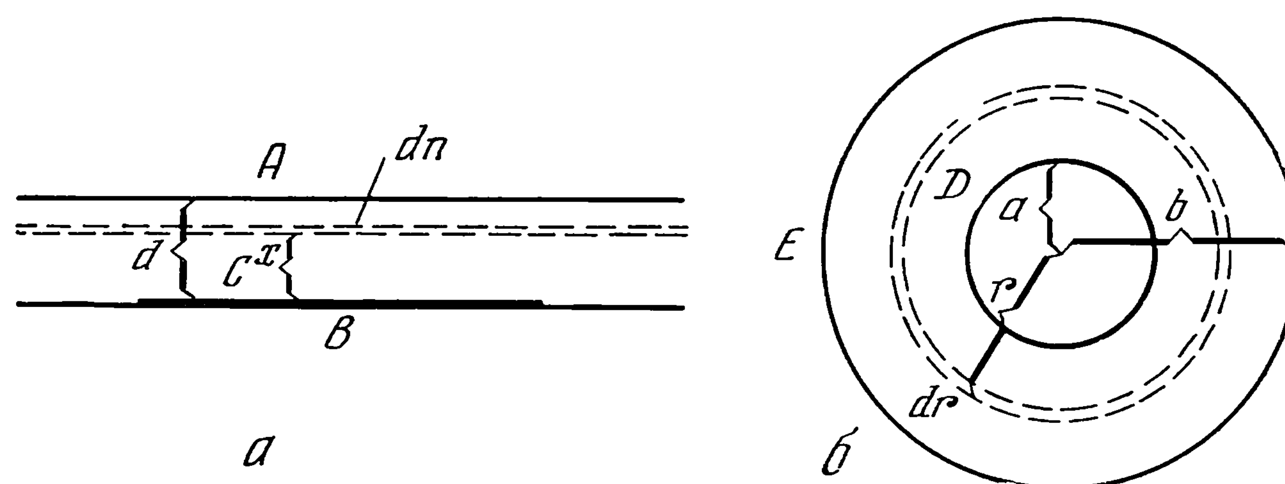


Рис. 2

Поскольку скорость образования ионов пропорциональна интенсивности излучения, то общее число ионов n, образующихся за 1 *сек* между плоскостями A и C в слое толщиной d, дается выражением

$$n = \int_0^d KSI_0 e^{-\lambda x} dx = \frac{KSI_0}{\lambda}(1 - e^{-\lambda d}) \qquad (K = \text{const}).$$

Если между пластинами приложена такая э. д. с., что все ионы оседают на пластины прежде, чем произойдет рекомбинация, то справедливо соотношение

$$i = n\varepsilon,$$

где ε — заряд иона; i — ток через газ. Отсюда

$$SI_0 = \frac{i\lambda}{K\varepsilon(1 - e^{-\lambda d})},$$

т. е. произведение интенсивности излучения и площади активной поверхности пропорционально току через газ.

Интересно выразить приведенное уравнение в таком виде, чтобы в него входила энергия, необходимая для образования иона.

Пусть W — средняя энергия, необходимая для образования иона в газе. Предположим, что энергия излучения при прохождении через газ тратится только на образование ионов. Вследствие этого поглощения интенсивность излучения изменяется от I_0 у поверхности активной пластины до $I_0e^{-\lambda d}$ у поверхности верхней пластины. Если n — полное число образовавшихся ионов, то

$$nW = SI_0(1 - e^{-\lambda d}),$$

где энергия, поглощенная над поверхностью S, записана в правой части уравнения, или

$$SI_0 = \frac{Wi}{\varepsilon(1 - e^{-\lambda d})},$$

а ток $i = n\varepsilon$, как и раньше.

Некоторые опыты, описанные в ранее опубликованных работах [3], позволяют заключить, что энергия, требующаяся для образования иона, по-видимому, одинакова как для всех газов, так и для всех давлений, и, как показали Дж. Дж. Томсон [4] и Таунсенд [5], заряд ионов одинаков во всех газах. В таком случае величина W/ε постоянна для всех газов и ток через газ зависит только от λ, d и SI_0.

Случай 2. Рассмотрим случай радиоактивного цилиндра, когда ток измеряется между двумя концентрическими цилиндрами. На рис. 2, *б* эти цилиндры показаны в сечении. Пусть a — радиус радиоактивного цилиндра D; b — радиус концентрического цилиндра E. Предположим, что длина цилиндра D велика по сравнению с расстоянием между цилиндрами. Если λ — коэффициент поглощения излучения, то видно, что интенсивность I на расстоянии r (вне цилиндра D) от центра равна

$$\frac{I}{I_0} = \frac{a}{r}e^{-\lambda(r-a)},$$

где I_0 — интенсивность излучения около поверхности.

Заметим, что без учета поглощения величина I падает обратно пропорционально расстоянию. Полная энергия излучения на единицу длины около поверхности внешнего цилиндра определяется выражением

$$I_0\frac{a}{b}e^{-\lambda(a-b)}2\pi b,$$

причем энергия на единицу длины вблизи активного цилиндра имеет множитель $I_02\pi a$.

Таким образом, полная энергия, поглощенная в газе, равна

$$I_02\pi a\{1 - e^{-\lambda(b-a)}\}.$$

Если n — число ионов, образующихся за 1 *сек* на длине l, равной длине активного стержня, то

$$Wn = I_0 \cdot 2\pi a l \{1 - e^{-\lambda(b-a)}\} = I_0 S \{1 - e^{-\lambda(b-a)}\},$$

где S — площадь активного цилиндра, или

$$SI_0 = \frac{Wi}{\varepsilon \{1 - e^{-\lambda(b-a)}\}} \qquad (i = n\varepsilon),$$

$$= \frac{Ai}{1 - e^{-\lambda(b-a)}} \qquad \left(A = \frac{W}{\varepsilon} = \text{const}\right).$$

В обоих рассмотренных случаях половина излучения поглощается в веществе, которое становится радиоактивным, а другая половина проходит через газ, поскольку излучение с поверхности происходит во всех направлениях. Когда излучение полностью поглощается в газе, максимальный ток i определяется выражением

$$SI_0 = Ai.$$

Сейчас мы проводим опыты по определению величины A, т. е. величины W/ε. Если A известно, то интенсивность излучения можно сразу выразить в абсолютных единицах.

Условия для образования радиоактивности в веществах

Чтобы *сосредоточить* радиоактивность, наводимую соединениями тория, на каком-либо проводнике, необходимо, чтобы он был заряжен отрицательно, а все другие тела — положительно. Для образования радиоактивности во всех соседних телах никакого электрического поля не требуется. Если окись тория поместить в закрытый заземленный сосуд, то стенки сосуда и все расположенные поблизости тела — проводники и изоляторы — становятся радиоактивными. Если, кроме того, поверхность окиси тория покрыть бумагой или тонкой алюминиевой фольгой, то внешняя сторона бумаги становится радиоактивной. Если не прикладывать э. д. с., то за данное время количество радиоактивности на единицу площади становится тем больше, чем ближе исследуемое тело расположено к окиси тория.

Если приложить э. д. с., то оказывается, что вещество, которое вызывает радиоактивность, движется вдоль силовых линий от положительных к отрицательно заряженным телам. Таким образом, радиоактивность можно *концентрировать* на небольших пластинках или тонких проволочках, если зарядить их отрицательно и поместить внутри заземленного закрытого металлического сосуда.

Если все тела не заряжены, то, благодаря процессу диффузии в газе, частицы, вызывающие радиоактивность, переносятся к поверхности тел

и прилипают к ним. Если в центре сосуда, на дне которого находится активная соль, закрепить тонкую проволочку, то ее нельзя сделать сильно радиоактивной, поскольку на ее поверхность может попасть только небольшое число активных частиц. Чем ближе, при прочих равных условиях, расположено тело к торию, тем активнее оно становится.

На рис. 3 показан общий вид прибора, использованного в опытах по концентрации активности на проводнике малой площади. Металлический сосуд V соединен с положительным полюсом батареи, набранной из

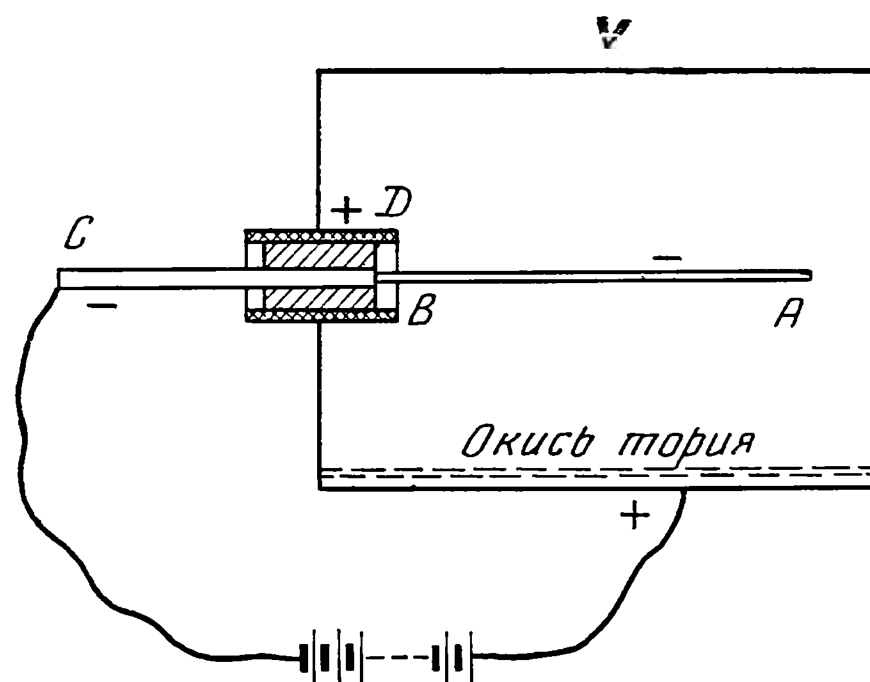


Рис 3.

небольших свинцовых аккумуляторов, которая имела напряжение 300 *в*. Другой полюс батареи заземлен.

На дне сосуда находился толстый слой окиси тория, покрытый несколькими слоями бумаги. В одну из стенок сосуда плотно вставлена латунная трубка D. К одному концу латунного стержня BC, служащего держателем, прикрепляется платиновая проволока AB. Держатель закреплен в изоляторе, вставленном внутрь цилиндра D. Держатель был вставлен так, чтобы его конец B не выступал из цилиндра D внутрь сосуда. Проводник AC был заземлен.

Таким образом, единственным заряженным телом в сосуде является заряженная проволочка. Под влиянием электрических сил активные частицы движутся к проволочке AB и прилипают к ней. Аналогичные результаты получались и в тех случаях, когда поверхность окиси тория покрывалась бумагой или тонкими слоями металлической фольги.

Обычное излучение тория почти целиком задерживают два или три слоя бумаги [6], так что получающийся эффект нельзя объяснить прямым излучением с поверхности.

В этом опыте я использовал кусок платиновой проволочки 1 *см* и диаметром 0,018 *см*, т. е. с поверхностью 0,056 *см*^{2} и обнаружил, что скорость разряда от этой проволочки в 20 раз больше, чем от толстого слоя окиси урана с площадью 25 *см*^{2}. Даже при такой небольшой активной поверхности мы могли легко получить значитель-

ную скорость движения стрелки электрометра — 200 делений за 5 *сек* (1 *в* дает отклонение на 40 делений по шкале электрометра: емкость всей цепи составляла около 50 *эл.-стат. ед.*).

Я говорил о применении платиновой проволочки, но для этой цели пригоден также любой металл. Если приложить большую э. д. с. и увеличить площадь поверхности окиси тория, то на единицу площади проводника легко можно получить в 20 раз бóльшую радиоактивность, чем в предыдущем случае. Из полученных результатов следует, что, уменьшая площадь отрицательно заряженного проводника и увеличивая количество тория, можно неограниченно повышать радиоактивность. Однако реально это ограничение должно вскоре наступить, поскольку для обеспечения движения всех радиоактивных частиц к проводнику небольших размеров необходимо прикладывать очень большие электрические силы.

Связь между «эманацией» тория и «возбужденной» радиоактивностью

В одной из предыдущих работ [6] я показал, что соединения тория испускают некое радиоактивное вещество, или «эманацию», которое может проходить через несколько слоев бумаги и тонкие слои металла, сохраняя способность к излучению в течение нескольких минут. Эти частицы диффундируют через газ и становятся центрами ионизации во всем объеме газа. Ток, проходящий между двумя заряженными пластинами, на одну из которых нанесен слой окиси тория, сильно уменьшается, если между пластинами непрерывно продувать медленный поток воздуха. Поскольку эти частицы не заряжены, то даже при наличии сильного электрического поля их легко можно удалить из пространства между пластинами потоком воздуха.

Между этой эманацией и возбужденной радиоактивностью существует тесная связь — эманация, в некотором смысле, есть непосредственная причина возбужденной радиоактивности. На существование этой связи указывают следующие факты:

1. Все исследованные соединения тория способны создавать радиоактивность в веществах, хотя и в различной степени. Чем больше количество эманации, тем сильнее возбужденная радиоактивность. Например, из всех соединений тория наиболее активна, как в смысле возбуждения радиоактивности, так и в смысле испускания эманации, окись тория. Тонкий слой окиси тория дает очень мало эманации и слабо возбуждает радиоактивность.

2. Вещества становятся радиоактивными, если даже активное соединение закрыть несколькими слоями бумаги или тонкой металлической фольгой. Эманация также легко проходит и через бумагу, и через тонкую металлическую фольгу. Два или три слоя обычной писчей бумаги полностью задерживают обычное излучение соединений тория, но слабо уменьшают величину наведенной радиоактивности.

3. Медленный поток воздуха, который быстро уносит эманацию по мере ее появления, уменьшает также способность к образованию радиоактивности. В закрытом сосуде наведенное излучение больше, нежели в открытом, поскольку в последнем случае имеется движение воздуха.

4. Окись тория, нагретая до достаточно высокой температуры, испускает очень мало эманации и создает небольшую радиоактивность.

Обобщая, можно сказать, что присутствие эманации необходимо для образования радиоактивности в веществах, а количество радиоактивности зависит от количества эманации. Радиоактивные вещества, которые не дают эманации, не создают также никакой возбужденной радиоактивности.

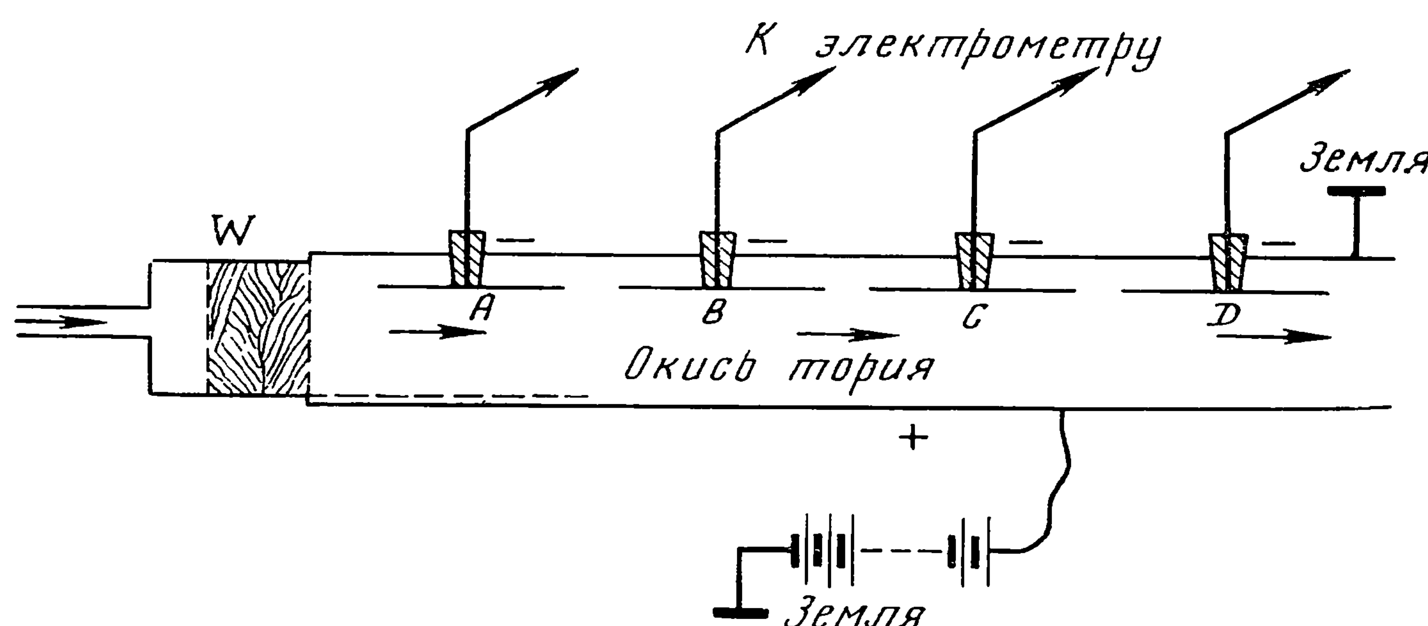


Рис. 4

Для дальнейшего выяснения этого вопроса мы поставили следующий эксперимент. Его схема показана на рис. 4.

Слабый поток воздуха из газового баллона пропускался через серную кислоту и затем через прямоугольный деревянный сосуд длиной 60 *см*. Чтобы удалить пыль и брызги из воздуха, а также выравнять скорость воздуха по сечению, поток пропускался через шерстяной фильтр *W*. В нижней части сосуда помещалась металлическая пластина, заряженная положительно. К верхней металлической пластине, подсоединенной к земле, крепились четыре изолированные металлические пластинки *A*, *B*, *C* и *D*, расположенные на равном расстоянии одна от другой. Под электродом *A* помещалась окись тория, закрытая бумагой.

Через сосуд в течение 7 *час* пропускался поток воздуха с постоянной скоростью около 0,2 *см/сек*, а между верхней и нижней пластинами прикладывалось напряжение 300 *в*. В табл. 1 приведены относительные значения тока, полученного с электродов *A*, *B*, *C* и *D* вследствие эманации и наведенной радиоактивности.

Чтобы сравнивать токи от эманации и наведенной радиоактивности, их значения с электрода *A* принимаются в обоих случаях за единицу. Как видно, радиоактивность, образуемая на пластинах, расположенных на некотором расстоянии от окиси тория, приблизительно пропорциональ-

Таблица 1

Пластина	Ток, вызванный эманацией	Ток, вызванный возбужденной радиоактивностью
A	1	1
B	0,55	0,43
C	0,18	0,16
D	0,072	0,061

на току с пластины, вызываемому эманацией. Из этого опыта можно заключить, что радиоактивность, в некотором смысле, обязана именно эманации или чему-то, что сопровождает ее, а не прямому действию излучения окиси тория.

Поглощение излучения веществами

Все радиоактивные вещества, точно так же, как и тела, становящиеся радиоактивными описанным выше способом, ионизуют окружающий газ и действуют в темноте на фотопластинку. Идентичность двух типов излучения можно определить простым методом, заключающимся в измерении поглощения излучения тонкими металлическими фольгами. Если при этом поглощение неодинаково, то можно говорить о двух различных излучениях.

Мы измеряли ток между двумя параллельными пластинами, одна из которых была радиоактивной; на эту пластину помещали слои поглощающего вещества равной толщины. В качестве примера ниже приведена зависимость тока (который пропорционален интенсивности излучения) от числа листков алюминиевой фольги, помещенных на цинковую пластину, ставшую радиоактивной (площадь цинковой пластины 12×18 *см*^{2}; толщина фольги 0,0004 *см*; разность потенциалов между пластинами 95 *в*):

Число слоев алюминиевой фольги	0	1	2	3	4	5	6
Ток от радиоактивного цинка	1	0,71	0,55	0,43	0,32	—	0,155
Ток от тонкого слоя окиси тория	1	0,57	0,36	0,23	0,13	0,084	0,056

Результаты измерения зависимости тока от толщины фольги приведены в опыте с *тонким* слоем окиси тория, которая служила эталоном для сравнения с возбужденным излучением. Ток от радиоактивной поверхности, не покрытой фольгой, принимается за единицу.

На рис. 5 эти же результаты представлены графически в виде кривых. По оси ординат отложен ток, а по оси абсцисс — толщина алюминия.

Видно, что излучение цинка и излучение окиси тория совершенно различны по своему характеру, причем излучение цинка гораздо легче проникает через алюминий. Оба излучения приблизительно однородны по составу. Ток, который пропорционален интенсивности излучения, уменьшается приблизительно в геометрической прогрессии, тогда как толщина металла увеличивается в арифметической прогрессии.

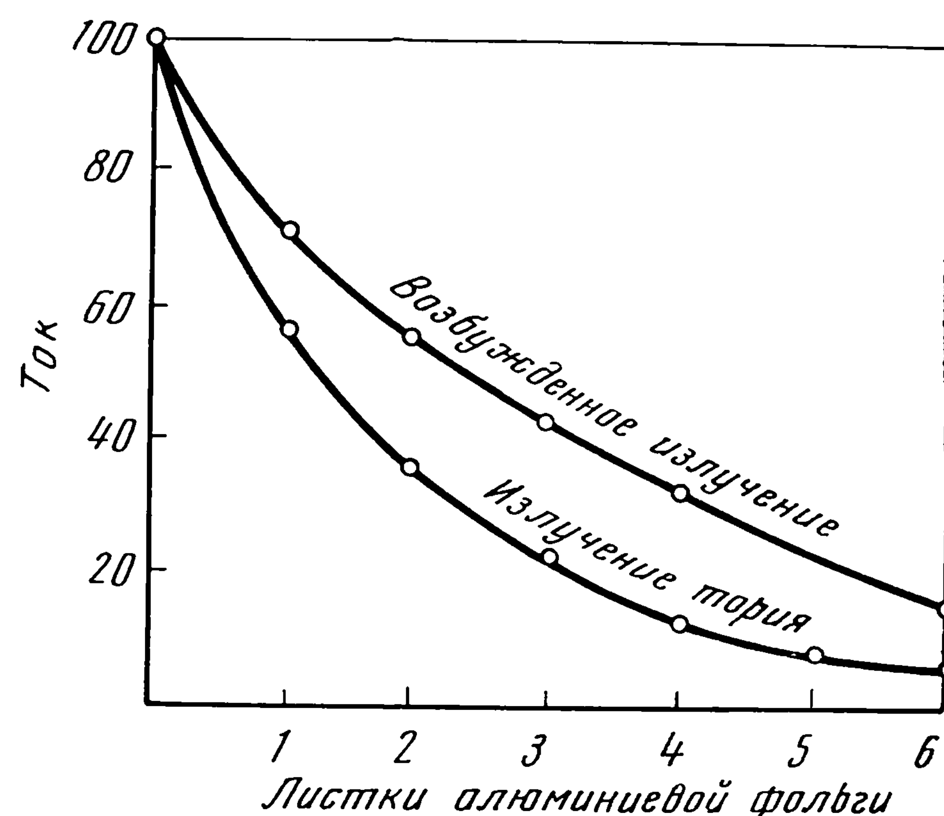


Рис. 5

Такое же различие между этими двумя излучениями наблюдается и в опытах по поглощению излучения тонкими слоями бумаги, листовым золотом, серебряной фольгой и сплавом меди с цинком.

В качестве примера приведена табл. 2 поглощения излучений цинковой пластинки и тонкого слоя окиси тория листками папиросной бумаги (толщина слоя бумаги 0,003 *см*; разность потенциалов между пластинами 50 *в*).

Этот метод можно также использовать для сравнения излучения различных металлов, которые становятся радиоактивными. Таким способом было обнаружено, что различные вещества — Cu, Pb, Pt, Al, Zn, латунь, картон, бумага,— становясь радиоактивными, испускают излучение одинаковой проникающей способности. Было обнаружено также, что полированные и неполированные поверхности испускают один и тот же тип излучения и что это не зависит от степени концентрации радиоактивности.

Таблица 2

Число слоев бумаги	Ток	
	Излучение цинка	Излучение окиси тория
0	1	1
1	0,57	0,37
2	0,35	0,16
3	0,20	0,080
4	0,12	0,055

Поскольку все металлы и неметаллы, такие, как картон и бумага, при различных условиях испускают излучение одного и того же типа, то мы можем заключить, что либо тип излучения не определяется непосредственно составом вещества, которое становится радиоактивным, либо излучение всех веществ создает одинаковый эффект.

«Возбужденное» излучение обладает большей проникающей способностью, чем излучение урана, тория, а также полония и радия, выделенных из урановой смоляной обманки.

Поглощение излучения в воздухе

Мы исследовали поглощение наведенного излучения в воздухе. В этих опытах использовался метод, подобный описанному в работе [3], посвященной определению поглощения излучения урана в различных газах. Аналогичный прибор применял Оуэнс [7] в опытах с излучением тория.

Две изолированных металлических пластины, расположенные на фиксированном расстоянии одна от другой, могли перемещаться с помощью винта относительно параллельной им радиоактивной поверхности. Излучение от активной поверхности проходило через круглое отверстие в нижней пластине, покрытой тонкой алюминиевой фольгой, и попадало на верхнюю пластину. Измерялся ток между двумя пластинами при различных расстояниях от радиоактивной пластины. Между двумя пластинами прикладывалось большое напряжение. Если радиус активной пластины велик по сравнению с расстоянием от активной пластины до нижней измерительной пластины, то ток между пластинами зависит от расстояния x до нижней пластины как $e^{-\lambda x}$, где λ — коэффициент поглощения излучения в газе.

Ниже приводятся результаты, полученные в опытах со свинцовой пластиной, которая была сделана сильно радиоактивной:

Расстояние от поверхности, *мм*	$d\,(=3)$	$d+6,25$	$d+12,5$	$d+18,7$	$d+25$	$d+31,2$	$d+37,5$
Ток	1	0,79	0,59	0,46	0,35	0,27	0,21

За единицу принимается ток при расстоянии $d = 3$ *мм* от активной свинцовой пластины.

Для сравнения мы приводим полученные таким же методом результаты опытов с тонкими слоями окиси тория и окиси урана, нанесенными на пластину:

излучение тория:

Расстояние, *мм*	$d\,(=2,25)$	$d+5$	$d+10$	$d+15$	$d+20$
Ток	1	0,73	0,50	0,35	0,25

излучение урана:

Расстояние, *мм*	$d\,(=2,25)$	$d+2,5$	$d+5$	$d+7,5$	$d+10$	$d+15$	$d+20$
Ток	1	0,685	0,445	0,296	0,188	0,088	0,059

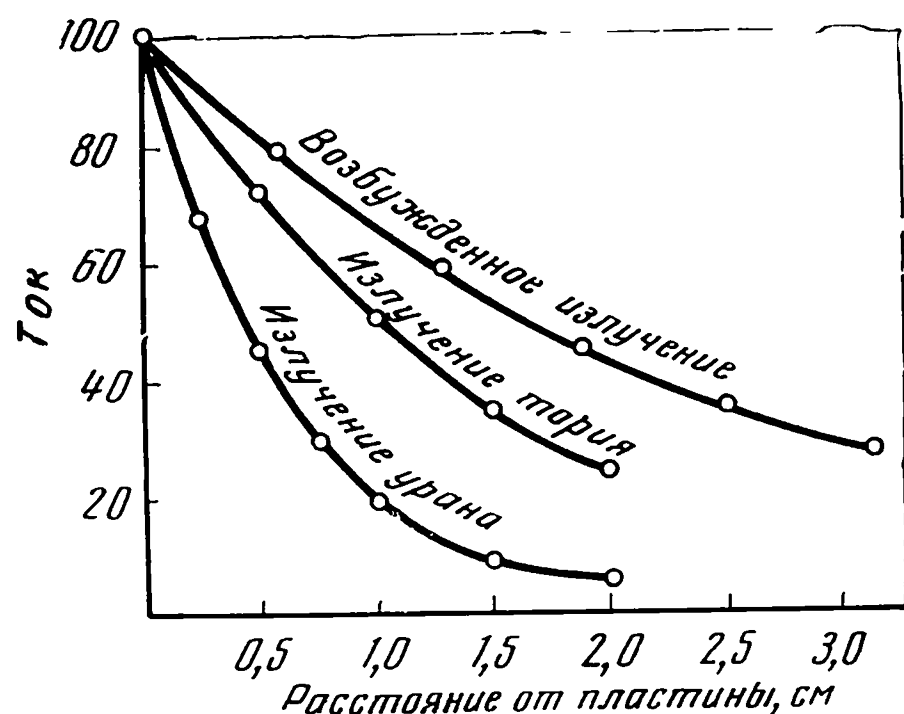


Рис. 6

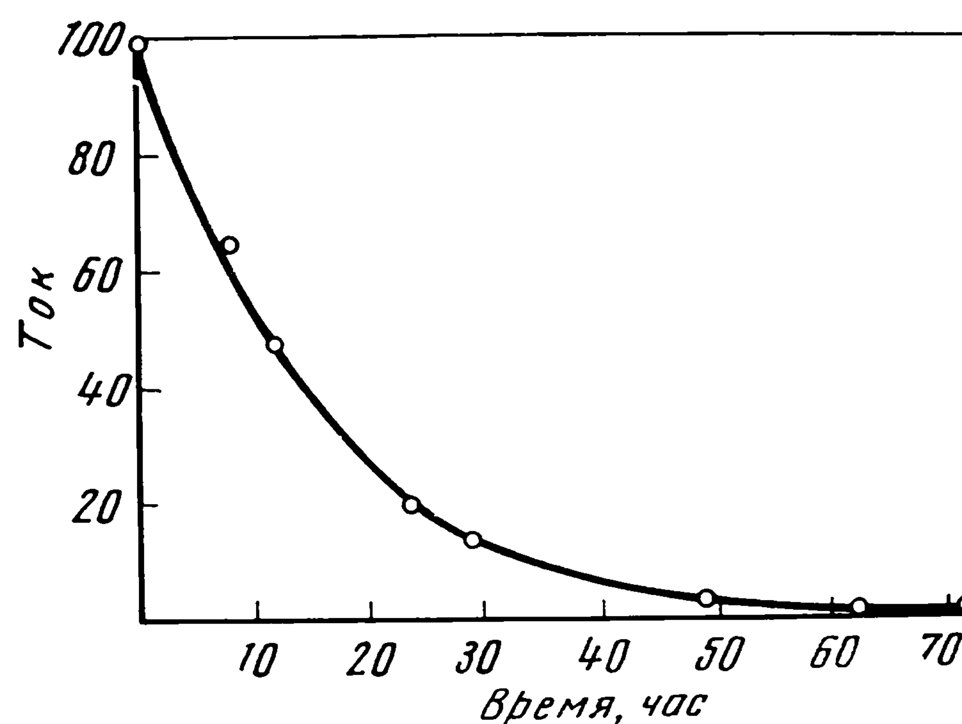


Рис. 7

На рис. 6 эти результаты показаны графически. Видно, что интенсивность излучения уменьшается почти в геометрической прогрессии, когда расстояние увеличивается в арифметической прогрессии. Кривые поглощения излучения тория в воздухе при различных давлениях были получены Оуэнсом [7].

При нормальных температуре и давлении интенсивности этих трех типов излучения — урана, тория и активного свинца — уменьшаются наполовину при прохождении 4, 10 и 16,5 *мм* воздуха соответственно.

Если предположить, что интенсивность уменьшается как $e^{-\lambda x}$, то получим следующие значения λ для различных типов излучения:

«Возбужденное» излучение	0,42
Излучение урана	1,6
Излучение тория	0,69

Таким образом, если сравнивать эти три типа излучений по степени поглощения, то они располагаются один за другим в одном и том же порядке как в опытах с воздухом, так и в опытах с алюминием и бумагой.

Возбужденное излучение имеет бо́льшую проникающую способность, чем α-излучение урана [3], легко поглощаемое веществами, но гораздо меньшую, чем β-излучение. Излучения радия и полония также сильнее поглощаются в воздухе, чем возбужденное излучение.

Продолжительность радиоактивности

Если пластинку или проволоку, ставшие радиоактивными, удалить от тория, то интенсивность излучения спадает по очень простому закону.

Мы провели много опытов по измерению продолжительности наведенной радиоактивности в различных материалах при различных условиях.

Типичные результаты, полученные с радиоактивным стержнем из латуни, приводятся ниже. Чтобы измерить время распада интенсивности, радиоактивный стержень помещался концентрически внутри цилиндра. Далее обычным способом с интервалами в несколько часов измерялся ток между двумя цилиндрами при разности потенциалов 50 *в* (длина стержня 31,5 *см*; диаметр 0,40 *см*; внутренний диаметр измерительного цилиндра 7,3 *см*):

Время, *час*	0	7,9	11,8	23,4	29,2	32,6	49,2	62,1	71,4
Ток	1	0,640	0,474	0,196	0,138	0,103	0,0370	0,0186	0,0086

Максимальный ток $1{,}6 \cdot 10^{-11}$ *а* принят за единицу.

На рис. 7 полученные результаты представлены графически. Они показывают, что ток через газ (пропорциональный интенсивности излучения) уменьшается со временем в геометрической прогрессии. Время, за которое излучение падает наполовину, составляет около 11 *час*. Если I_0 — первоначальная интенсивность излучения, то спустя время t интенсивность I определяется выражением

$$I = I_0 e^{-Lt} \qquad (L = \text{const}).$$

Этот закон выполняется точно для всех веществ, которые становятся радиоактивными. Никакого различия в скорости распада излучения, испускаемого большой поверхностью и сконцентрированного на тонкой проволоке, мы не обнаружили. Скорость распада не зависит также от того, какое вещество сделано радиоактивным. Лист бумаги, слюда, металл — все дают одну и ту же скорость уменьшения интенсивности. Согласно результатам проведенных опытов, на скорость затухания не влияет ни давление окружающего воздуха, ни степень его влажности. Скорость распада всегда одинакова при всех условиях, если поверхность не обрабатывалась механическим или химическим способом.

Среднее значение L, полученное из этих опытов, равно 0,0000189.

В одной из предыдущих работ [6] я показал, что радиоактивная эманация соединений тория быстро теряет радиоактивные свойства.

В этом случае интенсивность падает наполовину приблизительно за 1 *мин*, тогда как интенсивность «возбужденного» излучения падает наполовину приблизительно за 11 *час*, т. е. в 660 раз медленнее, чем в первом случае. Закон спадания интенсивности в обоих случаях один и тот же.

Ранее было показано, что ток i (в случае «насыщающей» э. д. с.) между двумя цилиндрами определяется выражением:

$$i = \frac{SI_0}{A}\{1 - e^{-\lambda(b-a)}\};$$

обозначения те же, что и ранее.

Интенсивность I излучения через время t определяется выражением

$$I = I_0 e^{-Lt},$$

и общее количество электричества, которое пройдет между цилиндрами за время, пока интенсивность спадет до нуля, определяется выражением

$$Q = \int_0^\infty i dt = \frac{SI_0}{A}\{1 - e^{-\lambda (b-a)}\}\int_0^\infty e^{-Lt}dt = \frac{SI_0}{LA}\{1 - e^{-\lambda (b-a)}\},$$

и если i_0 — первоначальный ток, то ясно, что

$$Q = \frac{i_0}{L}.$$

В приведенных выше данных первоначальный ток составлял $1{,}6 \cdot 10^{-11}$ *а*, а величина L равнялась 0,0000189. Таким образом, общее количество электричества, которое проходит между цилиндрами, равно $8{,}5 \cdot 10^{-7}$ *кулон*.

Если излучение целиком поглотится в газе, то общее количество электричества будет, очевидно, в $1/(1 - e^{-\lambda(b-a)})$ раз больше.

Для приведенного выше случая $a = 0{,}20$ *см*, $b = 3{,}65$ *см*, $\lambda = 0{,}42$. Таким образом, количество электричества, проходящего между цилиндрами, равно $11{,}1 \cdot 10^{-7}$ *кулон*.

Увеличение возбужденной радиоактивности со временем

Если в закрытом сосуде рядом с окисью тория поместить пластинку или проволоку, то их радиоактивность сначала увеличивается почти пропорционально времени, а затем по более медленному закону, и через несколько дней экспозиции она стремится к некоторому максимальному значению.

Ниже в качестве примера приведены результаты опытов с квадратной цинковой пластинкой площадью 86 *см*^{2}, помещенной в металлический сосуд, которая становилась активной при разности потенциалов 300 *в* между ее поверхностью и торием. Пластинка регулярно вынималась из сосуда, и определялся ток, вызванный ее действием на газ между двумя параллельными пластинами, как показано на рис. 1:

Время экспозиции, *час*	1,58	3,25	5,83	9,83	14,00	23,41	29,83	47,00	72,50	96,00
Ток	0,063	0,105	0,289	0,398	0,586	0,773	0,834	0,898	0,951	1,00

За единицу принят ток после четырех дней экспозиции, поскольку скорость разряда к этому времени почти достигала максимального значения.

Максимальное значение тока, вызванного излучением активной пластины, при расстоянии между измерительными пластинами 4 *см*, составляло $1{,}7 \cdot 10^{-11}$ *а*.

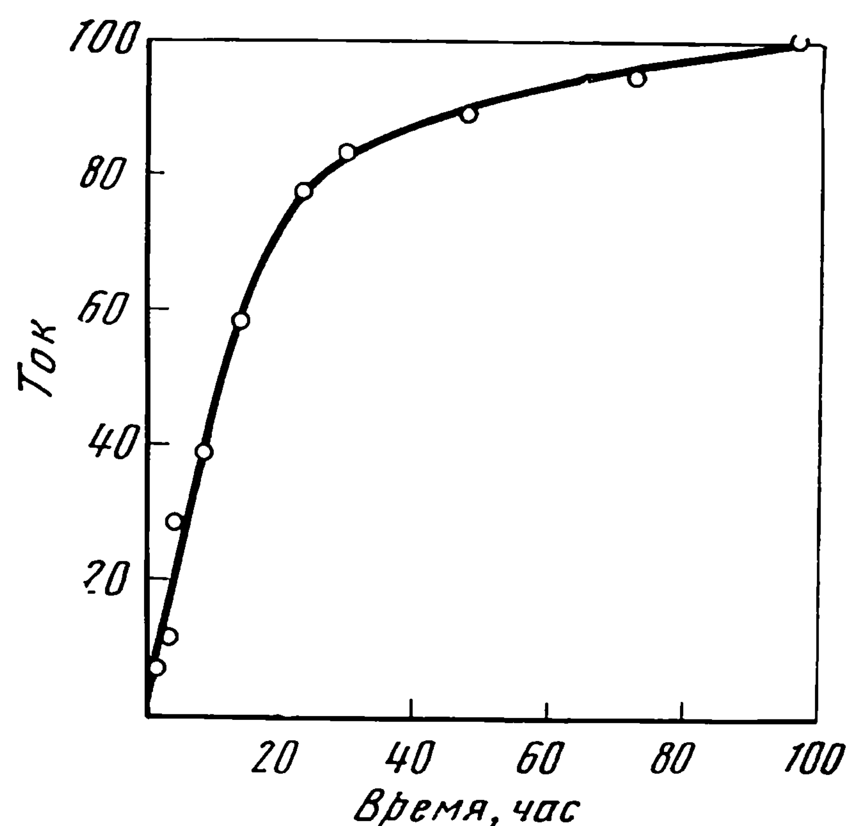


Рис. 8

На рис. 8 эти результаты представлены графически. Из приведенных данных видно, что интенсивность достигает значения, равного половине максимального, приблизительно через 12 *час*.

Теперь рассмотрим причины, вызывающие увеличение интенсивности излучения поверхности, которая подвергается действию соединений тория. Будем предполагать, что поверхность, которая становится радиоактивной, заряжена отрицательно.

Здесь, очевидно, играют роль два противоположных фактора. На пластину непрерывно садятся новые радиоактивные частицы, а интенсивность излучения активной поверхности непрерывно уменьшается, поскольку излучение уносит энергию. Система приходит в равновесие, когда скорость увеличения интенсивности вследствие прихода новых радиоактивных частиц сравняется со скоростью уменьшения интенсивности за счет излучения энергии с активной поверхности.

Пусть I — интенсивность излучения у поверхности пластины в какой-то данный момент времени. Скорость уменьшения интенсивности равна LI, поскольку I в момент времени t описывается выражением

$$I = I_0 e^{-Lt}$$

и

$$\frac{dI}{dt} = -LI.$$

Пусть q — скорость роста интенсивности из-за непрерывного поступления радиоактивного вещества. Тогда

$$\frac{dI}{dt} = q - LI$$

или

$$\ln(q - LI) = -Lt + A.$$

Но $I = 0$ при $t = 0$, поэтому

$$A = -\frac{1}{L}\ln q,$$

а также

$$\ln\frac{q - LI}{q} = -Lt$$

или

$$I = \frac{q}{L}(1 - e^{-Lt}).$$

Когда Lt очень велико, максимальное значение интенсивности I_0 равно

$$I_0 = \frac{q}{L}, \qquad \frac{I}{I_0} = 1 - e^{-Lt}.$$

Таким образом, уравнение, описывающее возрастание интенсивности излучения, совпадает с уравнением возрастания электрического тока в цепи с постоянной индуктивностью.

Кривая, приведенная на рис. 8, приближенно описывается этим уравнением. Например, интенсивность излучения достигла половины своей максимальной величины приблизительно через 12 *час*, а $e^{-Lt} = {}^1/_2$ при $t = 11$ *час*, т. е. по теории ток возрастет до половины максимальной величины через 11 *час*.

В начале кривой имеется некоторое расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами. Вначале скорость роста интенсивности меньше, чем то следует из теории. Однако скорость осаждения радиоактивного вещества на пластину, вероятно, не сразу приходит к стационарному значению, и это сказывается на полученных результатах. Все другие опыты, проведенные в различных условиях, тоже показывают, что в первые несколько часов экспозиции интенсивность очень мала.

До сих пор мы предполагали, что радиоактивные частицы движутся к поверхности под влиянием электрического поля. Уравнения, которые при этом используются, можно, однако, с одинаковым успехом применить и для процесса диффузии. Если не прикладывать никакой э. д. с., то радиоактивные частицы диффундируют через газ и прилипают к поверхности, с которой они сталкиваются. Равновесие достигается, когда скорость поступления новых радиоактивных частиц благодаря диффузии сравняется со спадом излучения. Таким образом, максимальная интенсивность излучения любой поверхности, расположенной рядом с соединением тория, пропорциональна числу частиц, которые достигают ее благодаря процессу диффузии.

Влияние э.д.с. на величину радиоактивности

Величина радиоактивности, возбужденной за заданное время, при малых напряжениях возрастает с напряжением, но затем достигает значения, после которого дальнейшее увеличение э. д. с. уже очень мало влияет на результат. Чтобы детально исследовать эту зависимость, мы поставили следующий опыт.

Были взяты два изолированных один от другого концентрических латунных цилиндра A и B (рис. 9) диаметром 5,5 и 0,7 *см*. Концы цилинд-

ров были закрыты парафиновыми пробками *C* и *D*. Цилиндр *A* подсоединялся к положительному полюсу батареи, другой полюс которой был заземлен. Цилиндр *B* был соединен с электрометром. На стенке цилиндра *A* был помещен завернутый в бумагу слой окиси тория. Вся система находилась в таком состоянии в течение трех дней. К этому времени интенсивность излучения, испускаемого цилиндром *B*, почти достигала максимума.

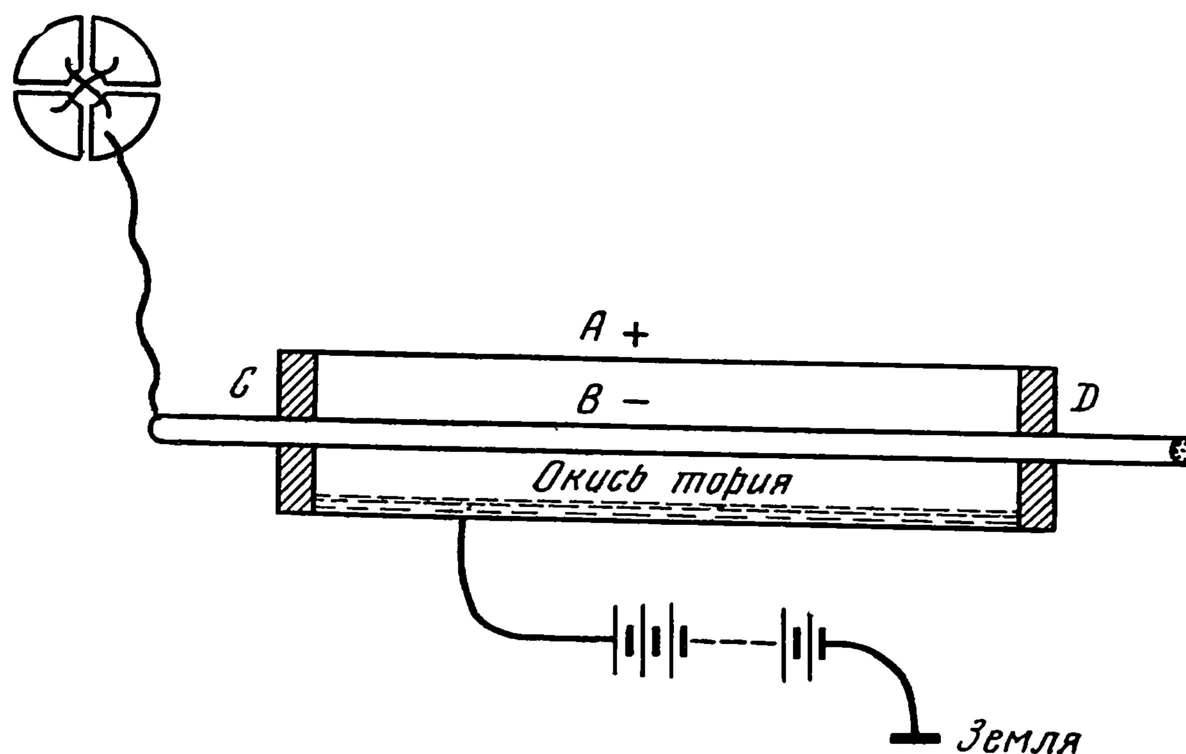


Рис. 9

В каждом из опытов при различных напряжениях проводились следующие измерения:

1) измерялся ток между *A* и *B* с окисью тория;

2) ток вновь измерялся после того, как окись тория была удалена и воздух между цилиндрами заменен;

3) цилиндр *B* заменялся неактивным цилиндром таких же размеров и опять измерялся ток.

Электрометр ежедневно проверялся с помощью градуировочного устройства Томсона, дабы сохранялась одна и та же чувствительность. При измерении больших скоростей разряда в цепь электрометра включался конденсатор емкостью 0,001 *мкф*.

Ток в опыте 3) состоит из тока утечки (если она имелась) и тока за счет радиоактивности, образующейся в концевых парафиновых пробках. Ток в опыте 2) возникал за счет радиоактивности цилиндра *B* и вследствие тех же причин, что в опыте 3). Ток в опыте 1) возникал за счет «эманации» окиси тория плюс те же причины, что и в опытах 2) и 3).

Таким образом, эти измерения позволили определить:

а) скорость разряда, обусловленную только торием;

б) скорость разряда за счет радиоактивности цилиндра *B*;

в) скорость разряда за счет радиоактивности стенок и концов сосуда.

Ниже приведены результаты (в делениях шкалы электрометра за 1 *сек*), полученные при различных напряжениях между цилиндрами:

Напряжение	0	3	5	10	20	310
Эманация	—	5,3	12,2	25,3	30,0	32,2
Радиоактивность цилиндра	1,32	4,02	4,53	6,69	7,40	9,91
Радиоактивность стенок и концов	5,58	3,06	1,97	1,51	0,59	0,75
Полная радиоактивность	6,90	7,08	6,50	8,20	7,99	10,66

На рис. 10 эти результаты показаны графически. Верхняя кривая выражает зависимость тока, вызванного эманацией, от напряжения; средняя кривая —изменение наведенной радиоактивности внутреннего цилиндра; нижняя кривая — изменение количества радиоактивности на стенках и концах цилиндров. Чтобы иметь возможность сравнить кривые на одном графике, масштаб по оси ординат для средней и нижней кривых увеличен в 3 раза по сравнению с масштабом на верхней кривой. Вид верхней и средней кривых одинаков. Обе кривые имеют перегиб приблизительно при одном и том же напряжении. Нижняя кривая показывает, что при уменьшении напряжения радиоактивность стенок и концов возрастает, а при нулевом напряжении она оказывается максимальной. Ток за счет радиоактивности цилиндра *B*, который приводится в третьей строке, измерялся при напряжении между цилиндрами, равном 50 *в*. Мы провели эти измерения также при напряжении 310 *в* между цилиндрами, но возможно, что значение тока при этом получается завышенным по сравнению с результатами, полученными в опытах с напряжением 50 *в*.

В пятой строке приведены значения полного тока, обусловленного как радиоактивностью стенок и концов, так и действием цилиндра *B*. Мы установили, что эти результаты мало различаются, за исключением опытов с напряжением 310 *в*, которые, как мы уже отмечали выше, по-видимому, очень завышены.

Результаты этих опытов показывают, что, по-видимому, торий испускает некоторое количество радиоактивных частиц, которые попадают на различные части сосуда, причем эффект от этих частиц такой же, как если бы они все были сконцентрированы на отрицательном электроде.

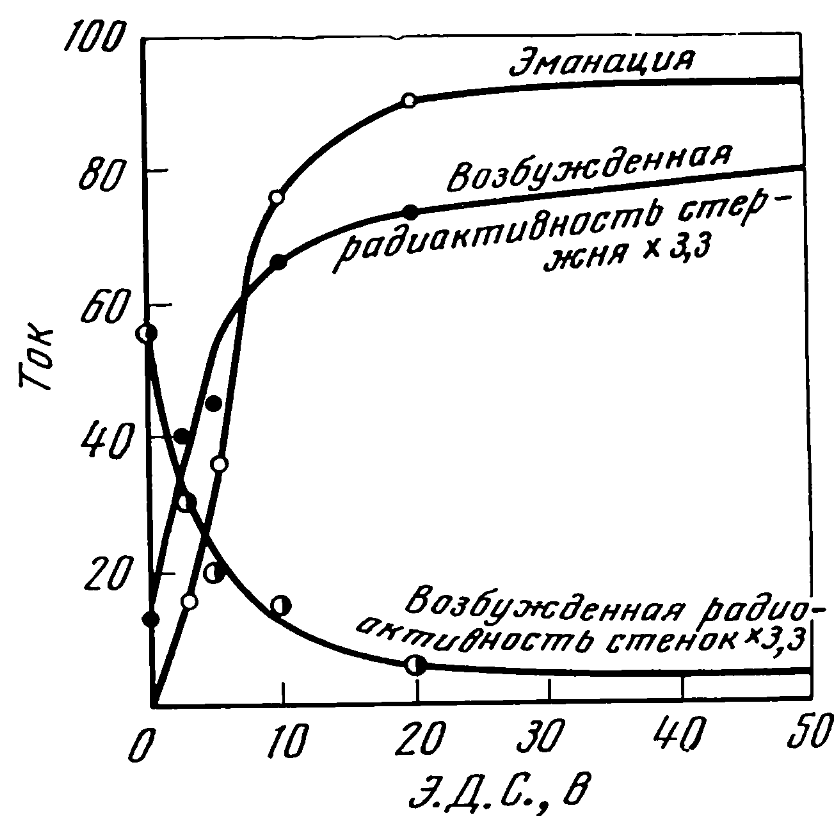


Рис. 10

Диффузия радиоактивных частиц

Особый интерес представляет случай, когда к электродам не прикладывается никакого напряжения и роль играет только диффузия радиоактивных частиц. Мы подвесили над бумажным пакетом с окисью тория лист бумаги, причем бумажный пакет был

свернут так, что он закрывал около четверти окружности цилиндра. Ниже мы приводим скорость разряда (в делениях за секунду), обусловленную радиоактивностью различных частей сосуда:

Радиоактивность внутреннего цилиндра	1,32
Радиоактивность бумаги	2,26
Радиоактивность внешнего цилиндра и пробок	3,32
Полная радиоактивность	6,90

Таким образом, ток, обусловленный полной радиоактивностью, равен току при напряжении 20 *в*, приложенному между цилиндрами. Опыты по выяснению влияния напряжения продолжались больше месяца, и некоторые из полученных результатов показывают, что в течение этого промежутка времени окись тория излучала нестабильно. Однако эти изменения не столь велики, чтобы исказить полученную общую картину.

Влияние давления на радиоактивность

Уменьшение давления газа с 760 до 20 *мм* рт. ст. очень слабо влияло на величину возбужденной радиоактивности, накапливающейся на отрицательно заряженном электроде.

Мы использовали такой прибор: латунный цилиндр *B* (рис. 11, *а*) с эбонитовой пробкой *C*, через которую проходил латунный стержень *A*, соединенный с ртутным насосом. Внутри цилиндра в бумажном пакете помещалась окись тория. Цилиндр *B* подсоединялся к положительному полюсу батареи напряжением 50 *в*, а стержень *A* — к отрицательному полюсу. Затем вся система возможно быстрее откачивалась до требуемого давления и оставлялась в таком положении на несколько часов. После этого стержень *A* извлекался, и с помощью другого измерительного цилиндра *D* (рис. 11, *б*) измерялся ток, возникающий вследствие радиоактивности. Соединения с батареей и электрометром показаны на рисунке. Загруженность другими работами не позволила нам провести измерения через равные промежутки времени, однако полученные результаты, которые приводятся ниже, достаточно полно характеризуют общую картину:

Давление, *мм* рт. ст.	760	175	16	4,5	1,7	0,45	0,04
Время экспозиции, *час*	5,25	20	4,1	5,4	4,8	14,3	25
Ток, деления за 1 *сек*	2,37	9,83	2,15	1,96	0,72	0,38	0,34
Ток, деления за 1 *сек* (интерполированные значения)	13,1	13,9	15,1	10,3	4,5	0,65	0,44

В третьей строке даны значения тока (выраженного в делениях электрометра за 1 *сек*), который в измерительном цилиндре был возбужден радиоактивным стержнем. В четвертой строке приводятся значения

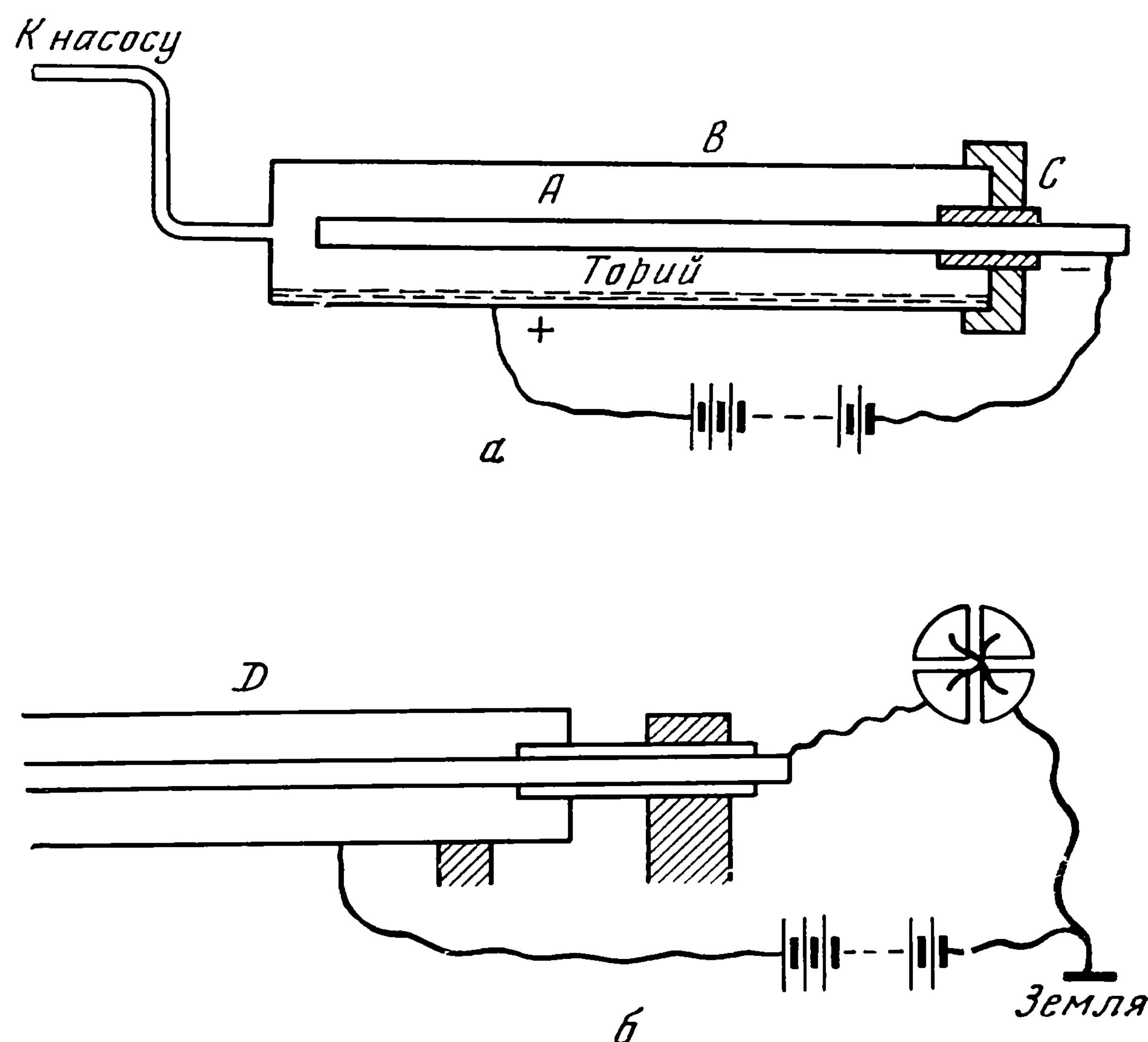


Рис. 11

а — прибор для возбуждения активности; *б* — измерительный прибор

тока (в делениях за 1 *сек*), соответствующие одинаковой экспозиции (три дня) стержня при различных давлениях. Результаты, записанные в первых двух строках, интерполировались с помощью кривой, показанной на рис. 8. Эти результаты нужно рассматривать как приблизительные, которые могут служить только для сравнительной оценки радиоактивности при различных давлениях. Отсюда ясны общие выводы. Радиоактивность почти одинакова при давлениях 16 и 760 *мм* рт. ст. В области давлений между 16 и 4,5 *мм* рт. ст. радиоактивность начинает уменьшаться, а при 0,45 *мм* рт. ст. составляет лишь $^1/_{20}$ от значения при атмосферном давлении. Дальнейшее уменьшение давления почти не влияет на радиоактивность.

Некоторый свет на это явление проливают специальные опыты, в которых изучалось распределение радиоактивности при низких давлениях. Если отрицательно заряженный стержень подвергнуть действию тория при низких давлениях, то обнаруживается, что этот стержень лишь слабо радиоактивен, тогда как внешняя поверхность бумаги, закрывающая окись тория, и стенки сосуда будут сильно радиоактивны. Если все условия оставить неизменными, а проводить опыт при атмосферном давлении, то радиоактивность концентрируется на стержне, а радиоактивность бумаги и стенок сосуда будет невелика. Все выглядит так, как будто при низком давлении радиоактивные частицы не могут достичь отрица-

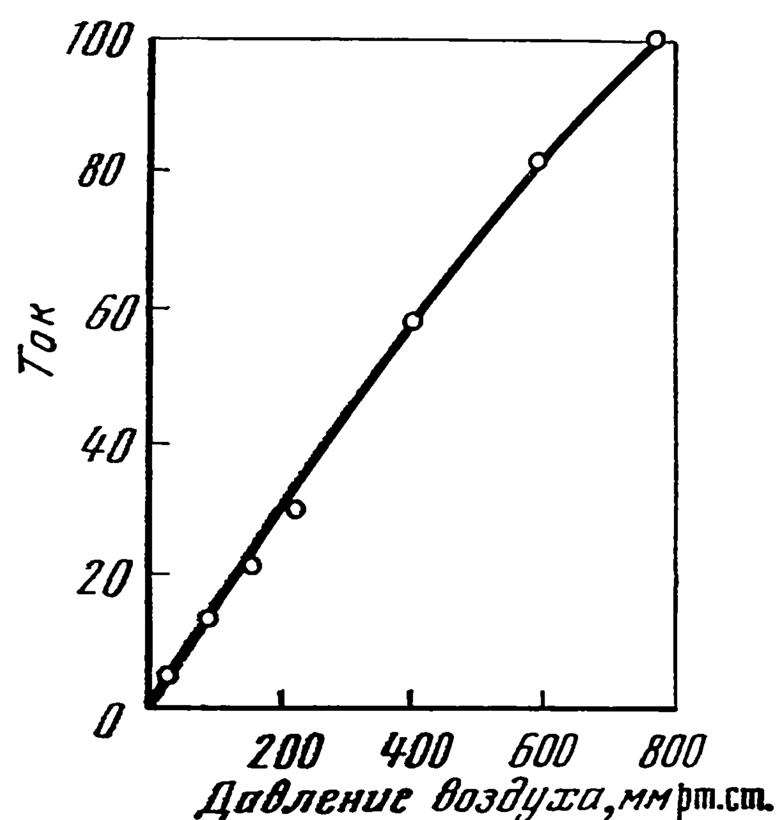


Рис. 12

тельного электрода. Это может происходить за счет увеличения скорости диффузии активных частиц при низком давлении, или, что более вероятно, вследствие того, что при низких давлениях «эманация» образует мало ионов.

Замечено, что ток через газ, возникающий за счет эманации, уменьшается почти пропорционально давлению, так что число ионов, присутствующих между цилиндрами при низком давлении, составляет небольшую часть числа ионов при атмосферном давлении.

Ниже приведены результаты опытов на приборе, показанном на рис. 11, *а*, по определению зависимости тока, обусловленного эманацией от давления воздуха:

Давление газа, *мм* рт. ст.	760	587	402	214	145	93	25
Ток за счет эманации	1	0,819	0,582	0,297	0,203	0,133	0,046

На рис. 12 эти результаты показаны графически. Зависимость представляет собой почти прямую линию. Если перенос радиоактивных частиц вызван движением ионов между цилиндрами, то при низких давлениях ионов может оказаться слишком мало, чтобы такой механизм мог эффективно работать.

Влияние газа

В этих опытах использовался прибор, изображенный на рис. 11. Величина радиоактивности, наведенной на центральном стержне, мало изменялась от рода газа, будь то водород, воздух или углекислый газ. В газах с водяными парами и без них не наблюдалось почти никакой разницы. Однако было замечено, что величина тока, обусловленного эманацией окиси тория, очень сильно зависит от рода газа. Если принять ток в воздухе при напряжении 50 *в* за единицу, то ток за счет «эманации» равнялся:

в воздухе — 1, в водороде — 0,35, в углекислом газе — 1,1.

Эти величины не обязательно должны быть пропорциональными константам ионизации газа, поскольку возникающий ток зависит от относительного поглощения лучей между цилиндрами.

Эти результаты, а также полученные в опытах с понижением давления воздуха показывают, что между током, обусловленным эманацией, и величиной наведенной радиоактивности какой-либо определенной связи не существует.

Химическое и механическое воздействие на радиоактивную поверхность

Ранее мы рассматривали условия, влияющие на образование и уменьшение наведенной радиоактивности. Теперь мы опишем некоторые опыты, поставленные с целью выяснить, чем действительно определяется возбужденная радиоактивность.

Если радиоактивность вызывается какой-либо радиоактивной пылью, осаждающейся на вещество, то эту пыль можно было бы обнаружить, исследуя поверхность вещества с помощью микроскопа, или же по увеличению веса образца. Мы подвергали в течение пяти дней отрезок тщательно взвешенной тонкой платиновой проволочки действию окиси тория, завернутой в бумажный пакет. Проволочка сделалась сильно радиоактивной. В пределах точности взвешивания никакого увеличения ее веса мы не обнаружили. Если вес и изменился, то это увеличение было менее $^1/_{20}$ *мг*. При наблюдении поверхности образца в микроскоп никакой концентрации частиц пыли также не было обнаружено. Из этого можно заключить, что если радиоактивность возникает за счет имеющихся на поверхности радиоактивных частиц пыли, то эти частицы должны быть чрезвычайно радиоактивными по отношению к их весу. По грубым оценкам, радиоактивность поверхностного слоя должна быть по крайней мере в 1 млн. раз сильнее радиоактивности урана или тория.

Величину излучения с активной поверхности всегда можно уменьшить, протерев поверхность материей или тонкой наждачной бумагой. Чтобы совсем удалить радиоактивность, нужно долго и тщательно стирать поверхностный слой наждачной бумагой.

Поток воздуха, направленный над радиоактивной пластиной, заметным образом не влияет на величину испускаемого излучения.

Радиоактивную платиновую проволоку или пластинку можно нагреть до белого каления, не изменив при этом существенно величины излучения. Нагрев влияет на тонкую проволоку сильнее, чем на пластинку, однако это происходит, по-видимому, под влиянием газов пламени.

Химическое воздействие

Погружение платиновой пластинки в воду, каустическую соду и азотную кислоту в нагретом и холодном состояниях существенно не влияло на радиоактивность. Серная или соляная кислоты быстро (в течение нескольких минут) сводили интенсивность излучения на нет. Раствор сернистой меди, если он обладал хотя бы слабыми кислотными свойствами, действовал на пластинку, но очень медленно. О влиянии некоторых растворов на радиоактивную платиновую пластинку дает представление следующий опыт. После действия каждого из растворов пластинка промывалась водой и просушивалась в пламени бунзеновской горелки. После того как пластинку продержали 4 *мин* в постепенно подогреваемой воде,

а затем 2 *мин* в кипящей воде, скорость разряда уменьшилась со 100 делений за 15,5 *сек* до 100 делений за 20 *сек*. После кипячения в течение 5 *мин* в каустической соде скорость разряда упала до 100 делений за 27 *сек*. Пребывание в течение 10 *мин* в сильно нагретой концентрированной азотной кислоте уменьшило скорость разряда наполовину. Раствор серной кислоты уменьшил скорость разряда наполовину после погружения пластинки на 10 *сек* и до $^1/_4$ первоначального значения после погружения на 60 *сек*. Соляная и серная кислоты разрушали радиоактивность гораздо сильнее, чем все другие исследованные растворы. В случае использования воды и каустической соды, как нам кажется, небольшое уменьшение интенсивности происходит скорее за счет механического воздействия пузырьков жидкости, нежели в результате химической реакции на поверхности.

Рассмотрим теперь вопрос о том, что приводит к потере радиоактивности при воздействии раствора на пластину — разрушение ли радиоактивной способности или же переход частиц в раствор. Чтобы выяснить это, мы поместили сильно активную тонкую платиновую проволочку на несколько минут в небольшое количество раствора серной кислоты. Проволока при этом потеряла бóльшую часть радиоактивности. Затем раствор выпаривался в песочной ванне, и мы обнаружили, что выпаренный на поверхность стекла осадок имеет очень большую активность. Из этого опыта можно заключить, что радиоактивность частиц не разрушается, а частицы переходят в раствор, и после выпаривания раствора остается радиоактивное вещество.

Было проделано несколько опытов с целью выяснить, сохраняет ли пластинка радиоактивность, если на нее электролитически осадить слой меди. Для этого в раствор сернокислой меди помещалась радиоактивная платиновая проволочка, служащая катодом, и через раствор в течение 1 *мин* пропускался ток силой около 0,5 *а*. Мы обнаружили, что измеренная обычным способом радиоактивность уменьшилась после этого до 0,7 своей первоначальной величины. Затем проволока промывалась в воде, выдерживалась в течение некоторого времени на воздухе, после чего измерялось уменьшение ее радиоактивности со временем. Сначала интенсивность излучения спадала быстрее, чем у проволоки, не покрытой медью, а по прошествии 10 *час* уменьшение активности стало обычным. Быстрота уменьшения активности вначале происходит, вероятно, потому, что в порах осажденной меди остается раствор серной кислоты. Когда платиновая проволочка служила анодом в растворе сернистой меди, радиоактивность быстро уменьшалась. Это объясняется в данном случае, вероятно, тем, что при прохождении тóка на поверхности анода образуется серная кислота, которая и растворяет радиоактивное вещество на платиновой пластинке.

Обсуждение результатов

Прежде чем перейти к вопросу о причинах и природе наведенной радиоактивности, дадим краткую сводку полученных результатов:

1. Все изученные соединения тория образуют радиоактивность в веществах, расположенных рядом с ними, если все тела не заряжены. Если проводники зарядить, то радиоактивность образуется на отрицательно заряженном теле. В сильных электрических полях радиоактивность может быть сконцентрирована на поверхности тонких проволочек. Из всех соединений тория самую сильную радиоактивность вызывает окись тория, однако если ее прокалить в течение нескольких часов при высокой температуре, то она эту способность теряет.

2. Способность соединений тория образовывать радиоактивность тесно связана с испусканием «эманации» и в некотором роде зависит от этой эманации.

3. Излучение, возбужденное в телах, однородно по составу и имеет бо́льшую проникающую способность, чем излучение тория и урана. Излучение сконцентрировано на поверхности вещества и не зависит от того, является ли вещество проводником или изолятором, а также от свойств поверхности.

4. Интенсивность испускаемого излучения уменьшается со временем в геометрической прогрессии, падая наполовину приблизительно за 11 *час*. Уменьшение активности излучения не зависит от концентрации радиоактивности и от природы вещества.

5. Величина наведенной радиоактивности сначала возрастает почти пропорционально времени экспозиции, но затем интенсивность излучения достигает некоторого значения и при дальнейшем увеличении экспозиции изменяется очень слабо.

6. Наведенная радиоактивность, образуемая за определенный отрезок времени, зависит от разности потенциалов между электродами и при больших э.д.с. стремится к постоянному значению.

7. Величина радиоактивности не зависит от давления газа, за исключением области низких давлений, когда величина радиоактивности отрицательно заряженного проводника уменьшается при понижении давления. Величина радиоактивности не зависит от рода газа, будь то водород, воздух или углекислый газ.

8. Никакого увеличения веса тела, ставшего радиоактивным, замечено не было. При помещении платиновой проволочки в пламя, горячую и холодную воду, азотную кислоту излучение не изменялось. Радиоактивность с поверхности можно было быстро удалить соляной и серной кислотой, причем активное вещество оставалось в растворе или выпаренном осадке.

Само собой напрашиваются три возможных объяснения наведенной радиоактивности:

а) радиоактивность есть подобие фосфоресценции и возбуждается в веществах под действием излучения тория;

б) радиоактивность вызывают положительные ионы газа, возникающие под действием эманации и осаждающиеся на веществе;

в) радиоактивность вызывается частицами радиоактивного материала, выделяемого соединениями тория и осаждающегося на веществе.

Предположение о том, что излучение есть подобие фосфоресценции, не объясняет полученных результатов, поскольку вещество можно сделать радиоактивным, не подвергая его прямому действию излучения, и, кроме того, радиоактивность можно сконцентрировать на отрицательном электроде. Вопрос о том, возникает ли возбужденная радиоактивность вследствие осаждения посторонних веществ на телах или же за счет действия положительных ионов, образованных в газах, а может быть, комбинации этих факторов, трудно решить однозначно на основе имеющихся экспериментальных данных. На первый взгляд кажется, что многие из полученных результатов можно объяснить, предположив, что за радиоактивность ответственны положительные ионы, образованные эманацией. Поскольку радиоактивные частицы эманации очень малы, то интенсивность излучения вблизи них должна быть очень велика; поэтому может происходить не только образование ионов, но и возбуждение сильных колебаний зарядов ионов; эти положительные ионы могут осесть на отрицательный электрод и постепенно рассеять энергию своего колебания путем излучения в пространство. С помощью этой теории трудно, однако, объяснить изменение радиоактивности с давлением. Опыт показывает, что при низких давлениях полная величина радиоактивности та же, что и при атмосферном давлении, но на отрицательный электрод попадает только небольшая часть радиоактивных частиц. Если бы радиоактивными частицами были положительные ионы, то мы должны были бы ожидать, что в сильном поле все частицы попадут на отрицательный электрод. Другие опыты, в которых исследовалась зависимость радиоактивности от расстояния, также не подтверждают эту гипотезу. Мы обнаружили, что радиоактивность практически одинакова при расстоянии между пластинами 3 *мм* и 3 *см*. В последнем случае эманация образует гораздо больше положительных ионов, однако это не влияет на величину радиоактивности.

Можно попытаться дать полное объяснение всем полученным результатам на основе теории, приписывающей возникновение радиоактивности осаждению радиоактивных частиц соединений тория. Однако при этом трудно удовлетворительным образом объяснить, как частицы получают положительный заряд, который они должны иметь, чтобы двигаться в электрическом поле по направлению к отрицательному электроду. Если предположить, что соединения тория испускают радиоактивные частицы с постоянной скоростью независимо от рода и давления газа, то мы должны получать одинаковую суммарную радиоактивность стенок сосуда как при диффузии частиц, так и при концентрации всех радиоактивных частиц на отрицательном электроде; активность не должна зависеть ни от давления, ни от рода газа, при условии, что газ не взаимодействует

с торием. Некоторые опыты указывают на то, что радиоактивные частицы при поступлении в газ не имеют заряда, но через некоторое время приобретают положительный заряд. Возможно, положительный заряд возникает за счет диффузии ионов, которые затем осаждаются на поверхность частицы. Поскольку имеются основания предполагать, что в большинстве случаев отрицательные ионы движутся в электрическом поле быстрее, чем положительные, то в газе всегда имеется избыток положительных ионов и, таким образом, частицы в газе стремятся получать в основном положительный заряд. Согласно этой теории, радиоактивность отрицательного электрода уменьшается при низком давлении, потому что в газе недостаточно ионов, чтобы зарядить частицы, вследствие чего они диффундируют к стенкам сосуда.

Как показали проведенные опыты, способностью возбуждать радиоактивность обладают, по-видимому, только соединения тория. Ни уран, ни радий, ни полоний не проявили этих свойств, однако использованные образцы[1] радия и полония были не очень радиоактивными и содержали значительное количество примесей. Пластина, которая была сделана радиоактивной, не была способна возбудить заметную радиоактивность в другой пластине, помещенной рядом. Я проверял положительные и отрицательные электроды после того, как между ними в течение нескольких часов проходил сильный ток, обусловленный рентгеновскими лучами, пламенем, искровым разрядом, но никаких следов радиоактивности не обнаружил.

Мак-Гиллский университет, Монреаль, 22 ноября 1899 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Curie P* Compt. Rend., 1898, 175.
2. *Curie P.* Compt. Rend., December 26, 1898.
3. *Rutherford E.* Phil. Mag., January, 1899.
4. *Thomson J. J.* Phil. Mag., December 1898.
5. *Townsend J. S.* Trans. Roy. Soc., 1899.
6. *Rutherford E.* Phil. Mag., January, 1900.
7. *Owens R. B.* Phil. Mag., October 124, 1899.

[1] Когда эта статья находилась в печати, мы получили номер Comptes Rendus от 6 ноября, в котором помещена статья Кюри и заметка Беккереля, посвященные излучению, возбужденному в телах радием и полонием. Кюри работала с образцами этих веществ, которые были в 10 000 и 50 000 раз более радиоактивны, чем уран, и она наблюдала явления, в некотором отношении похожие на те, что дают соединения тория; однако полученных данных недостаточно для проведения какого-либо сравнения. Ничего не говорится о влиянии электрического поля, была ли в наличии эманация радия и полония как в опытах с соединениями тория. Кюри пришла к выводу, что полученные результаты можно объяснить определенным типом фосфоресценции, возбуждаемой излучением. Автор данной статьи показал, что для тория такая теория неприменима. Представляет интерес провести дальнейшие опыты по сравнению радиоактивности, вызываемой торием, и радиоактивности, вызываемой радием и полонием.

ЭНЕРГИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ И БЕККЕРЕЛЕВЫХ ЛУЧЕЙ И ЭНЕРГИЯ, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ИОНА В ГАЗАХ *

(Совместно с Р. К. Мак-Клангом)

Основная цель описанных в этой статье исследований — определение количества энергии, необходимого для создания газового иона при прохождении лучей Рентгена через газ с тем, чтобы отсюда сделать заключение об энергии радиации, излучаемой в 1 *сек* ураном, торием и другими радиоактивными веществами. Для определения «ионной энергии» (как она для краткости будет называться) необходимо было провести специальное исследование по точному измерению теплового действия X-лучей при их поглощении металлами, а также по поглощению лучей газами.

Кратко опишем метод, примененный для определения ионной энергии. Полная энергия излучения, испускаемого за 1 *сек*, определялась путем измерения теплового действия известной порции лучей, поглощенной металлом. Общее количество ионов, образованное при полном поглощении лучей газом, определялось по измерению тока, обусловленного ионизацией известного объема газа, и по поглощению лучей газом, при этом в качестве заряда иона принималось значение, недавно определенное Дж. Дж. Томсоном.

Если допустить, что вся энергия X-лучей расходуется на образование ионов в газе, то мерой энергии, необходимой для получения одного иона, будет полная энергия лучей, деленная на общее количество полученных ионов.

В ходе исследования были рассмотрены следующие вопросы:

1. Измерение теплового действия X-лучей и их полной энергии, излучаемой в 1 *сек*.

2. Эффективность возбужденного X-лучами флуоресцирующего экрана, рассматриваемого как источник света.

3. Поглощение X-лучей газами при различных давлениях.

4. Энергия, необходимая для образования одного иона в газах, на основании чего делаются выводы:

а) о расстоянии между зарядами ионов в молекуле;

б) о минимальном потенциале, необходимом для создания искры в газах.

5. Скорость излучения энергии радиоактивными веществами: ураном, торием, радием и полонием.

---

* Philosophical Transactions of the Royal Society, 1901, ser. A, 196, 25—29. Представлено проф. Дж. Дж. Томсоном.

Тепловое действие Х-лучей

Опыты по тепловому действию рентгеновского излучения были проделаны Дорном [1]. Лучи частично поглощались металлической фольгой, помещенной в один из баллонов дифференциального газового термометра. Поглощенное металлом тепло передавалось газу и измерялось получившееся изменение объема. Для количественного измерения подведенного тепла определялся также тепловой эффект, обусловленный протеканием тока через проволоку, помещенную внутри баллона.

Моффат [2] получил значение энергии Х-лучей из фотометрических сравнений флуоресцирующего экрана со свечой Гефнера, рассматривая флуоресцирующий экран, возбужденный Х-лучами, как источник света. Если известна величина энергии видимого света нормальной свечи Гефнера, то можно подсчитать тепловой эффект лучей.

При определении теплового действия лучей возникают трудности, от которых свободны измерения теплового действия слабых источников видимого света. Во-первых, непостоянство рентгеновской трубки как источника излучения всегда вносит затруднения при длительных измерениях. Во-вторых, Х-лучи незначительно поглощаются тонкой металлической фольгой, тогда как световые лучи полностью поглощаются поверхностью тонкого металла, покрытой сажей. При прохождении лучей через тонкую металлическую фольгу поглощается лишь малая часть их энергии, а потому болометр Ленгли, в котором измеряется изменение сопротивления очень тонкого металлического листка, обусловленное подведенным лучами теплом, совсем непригоден для измерения энергии Х-лучей. Как будет пояснено ниже, обычные термопары вызывают серьезные возражения. Для измерения теплового действия лучей был применен специально сконструированный платиновый болометр, и измерялось тепловое действие по изменению сопротивления платины.

Описание болометра

Платиновая лента длиной около 3 *м*, шириной 0,5 *см* и толщиной 0,003 *см* была навита на слюдяную рамку, сделанную настолько легкой, насколько это совместимо с жесткостью. Рамка была размером 10 *см* × 10 *см*, ее форма показана на рис. 1, *а*. Платиновая лента навивалась вокруг рамки, причем полоски на передней стороне рамки частично перекрывали соответствующие полоски на задней стороне, но не касались их. Платиновая лента (всего 15 полных витков) поддерживалась в заданном положении пропилами на боковых сторонах слюдяной рамки. Расстояние между витками ленты составляло 1 *мм*. Две такие решетки, сделанные по возможности одинаковыми, были смонтированы в одной и той же вертикальной плоскости на деревянном основании. Сопротивление каждой решетки 4,2 *ом*. Площадь платиновой поверхности решетки 92,2 *см*^{2}.

Большая часть падающих на решетку Х-лучей проходит через две толщины платины, но поскольку витки перекрываются не полностью, не-

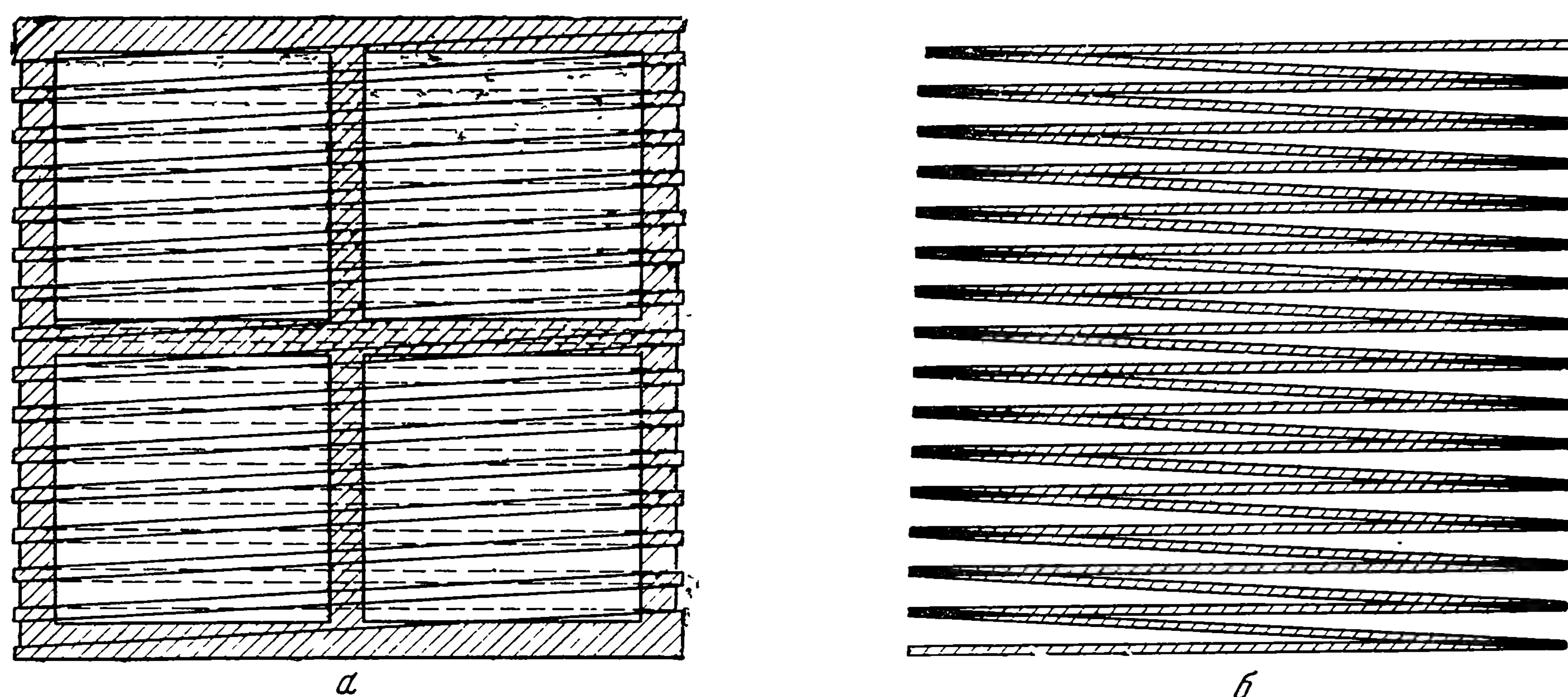


Рис. 1

которая часть лучей пройдет только через одну толщину. Это отчетливо было видно на снимке решетки в Х-лучах, который показан здесь в виде эскиза (рис. 1, *б*). Штриховкой показаны те части площади, где лучи проходят только сквозь одну толщину платины.

Слюдяная рамка весьма слабо поглощает лучи и лишь при очень тщательном осмотре фотографии могут быть обнаружены контуры рамки. Интенсивность Х-лучей после прохождения через решетку снижалась до 0,45 первоначальной величины.

Фокусирующая трубка

Лучи возбуждались в самофокусирующей трубке, схема которой показана на рис. 2, с платиновым анодом и алюминиевым катодом. Трубка возбуждалась большой катушкой, использовался прерыватель Венельта в цепи напряжением 110 *в*. Длина искрового промежутка *A* поддерживалась постоянной — около 5 *дюйм*. Колба была сделана очень прочной; чтобы поддерживать вакуум постоянным при работе трубки, последовательность искр через *A* была, как правило, довольно частой. Чтобы получать лучи одинаковой степени проницаемости, в этих опытах очень важно поддерживать постоянной длину искры *A*. Уменьшение длины искры снижает давление газа в трубке и создает лучи с меньшей проникающей способностью.

В течение 10 *сек* платиновая пластина нагревается до красного каления и остается такой еще 30 *сек*. Установлено, что трубку следует включать за четверть часа до начала измерений, чтобы привести ее в установившееся состояние, когда она испускает лучи постоянной интенсивности. При этих условиях опыты могли проводиться изо дня в день с максимальным изменением интенсивности около 30%, а обычно — много меньше.

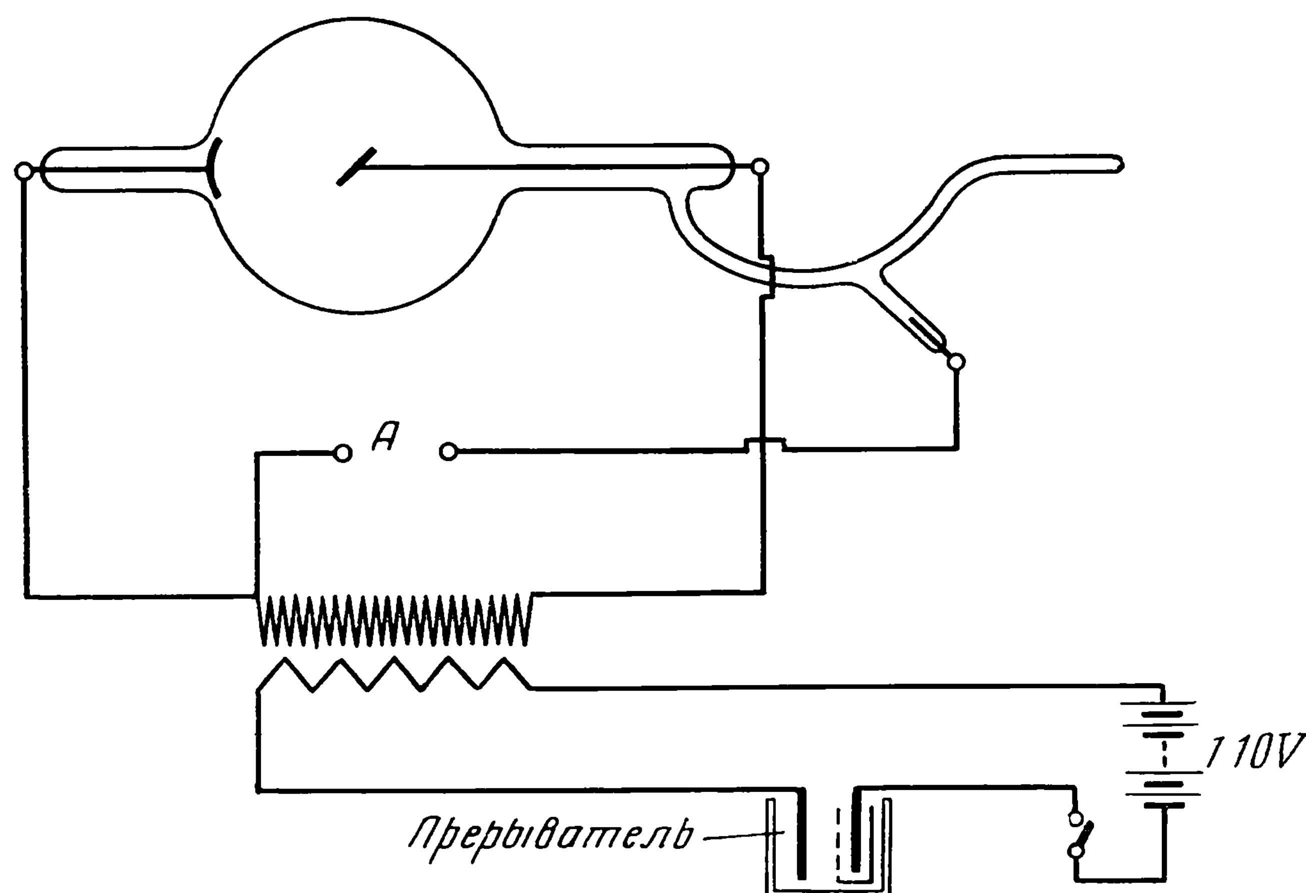


Рис. 2

Использованная трубка давала лучи высокой интенсивности и большой проницаемости. Флуоресцирующий экран ярко светился на расстоянии 20 *фут* от трубки. С «мягкой» трубкой и менее интенсивными лучами точно измерить тепловой эффект было бы трудно.

Прерыватель Венельта

Конструкция использованного нами прерывателя Венельта была очень проста. Свинцовая пластина устанавливалась внутри толстого стеклянного сосуда (был использован элемент Лекланше) с тремя отверстиями диаметром около 1 *мм*, просверленными в одной стенке. Стеклянный сосуд был размещен внутри эбонитового ящика со свинцовым электродом и наполнен обычным способом разведенной серной кислотой. Кислота охлаждалась циркуляцией воды по змеевику из свинцовой трубы в эбонитовом ящике. Соответствующим подбором конусности отверстий в стекле прерыватель был настроен на устойчивую работу с малой скоростью и давал сильные разряды на катушке. Э.д.с. батареи составляла 110 *в*, а ток — около 15 *а*. Среднее число размыканий составляло 57 в 1 *сек*. За срок более шести месяцев стеклянный сосуд заменялся лишь один раз из-за постепенного увеличения диаметра отверстий.

Схема установки

На рис. 3 показана общая схема опыта. Трубка и катушка были целиком скрыты в небольшой покрытой свинцом заземленной камере. Проходящие через круглое, закрытое алюминием отверстие в свинце лучи

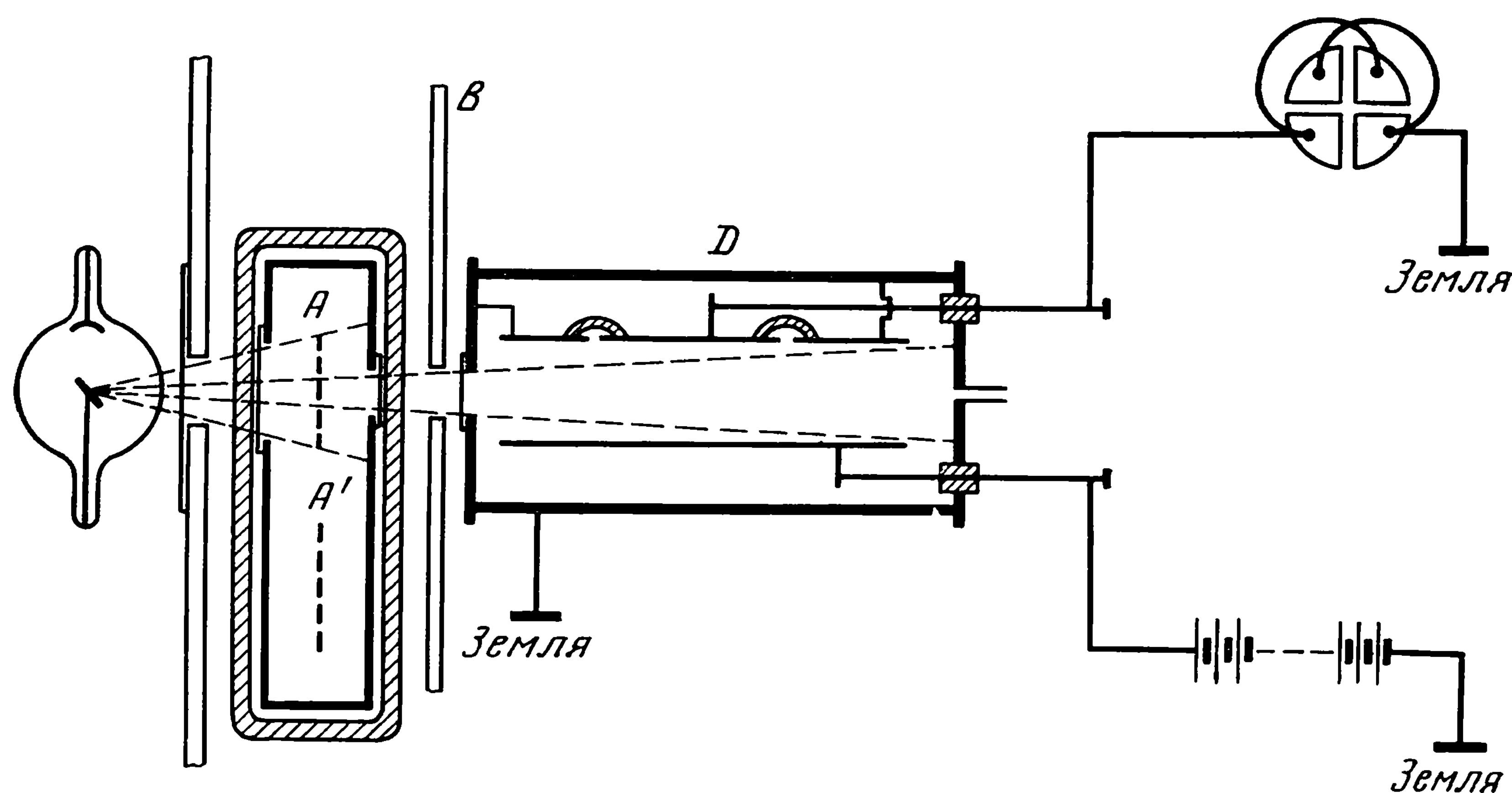


Рис. 3

падали на одну из платиновых решеток A. Пучок лучей, прошедший через решетку, выходил через прямоугольное отверстие в толстой свинцовой пластине B и создавал проводимость в воздухе внутри разрядного цилиндра D. Камера D служила просто для определения постоянства интенсивности лучей, испускаемых трубкой, путем измерения тока, возникающего между заряженными электродами. Разрядная установка будет подробно описана в дальнейшем.

Две решетки A и A' образовывали два плеча моста Уитстона (рис. 4). Два других плеча были образованы манганиновым цилиндрическим потенциометром на 22 *ом*, что соответствовало проволоке длиной около 25 *м*. Был применен чувствительный низкоомный гальванометр, показания на его шкале считывались с помощью телескопа.

Сначала баланс достигался при кратковременном прохождении тока батареи. Затем лучи включались на заданное время, обычно на 30 или 45 *сек*. Падая на решетку A, лучи частично поглощались и слабо нагревали платину, и ее сопротивление соответственно изменялось. Отклонение от нуля отмечалось сразу после прекращения испускания лучей.

Чтобы измерить количественно тепловое действие лучей, через решетку A пропускался постоянный ток на то время, что действовали лучи. Величина этого тока устанавливалась такой, чтобы отклонение от нуля получилось таким же, как для лучей. В этом случае количество тепла H, переносимое лучами в 1 *сек*, равно количеству тепла, выделенного током:

$$H = 0{,}24 i^2 R \text{ кал},$$

где i — ток через сетку; R — сопротивление сетки.

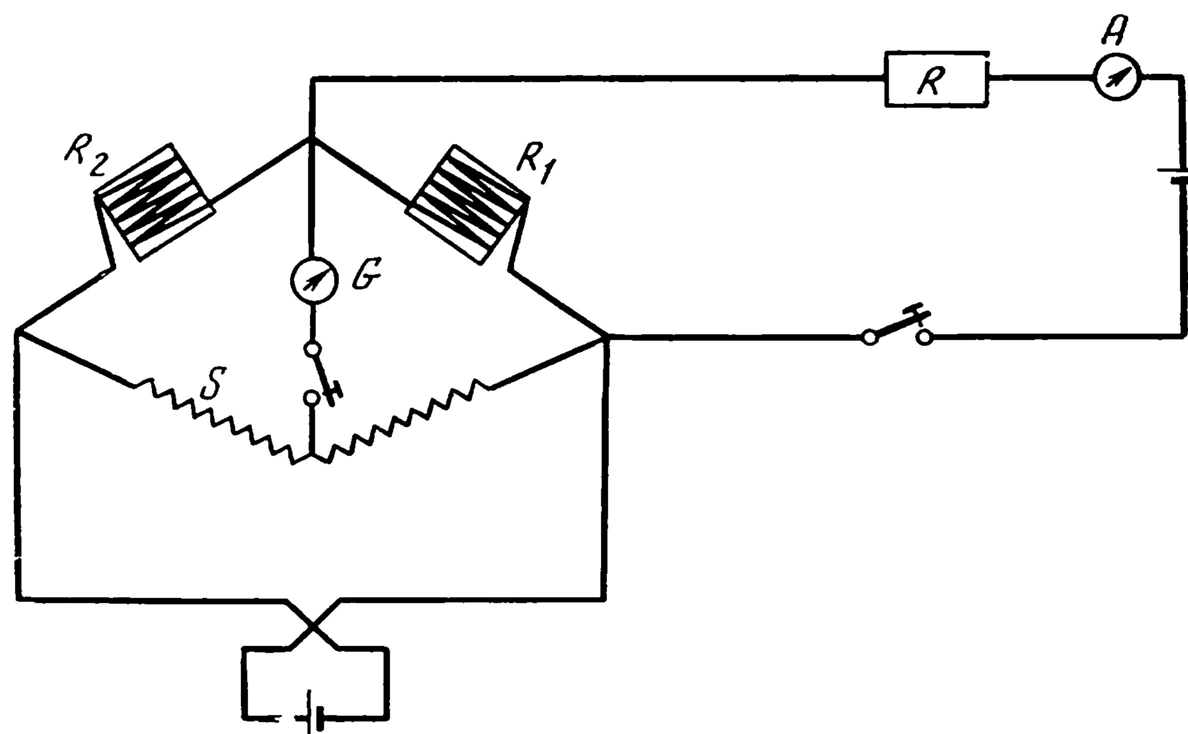


Рис. 4

Тепловой эффект от лучей мал и, следовательно, должны быть приняты меры, чтобы избежать нарушений баланса, обусловленных внешними причинами. Решетки были заключены в свинцовую камеру с алюминиевым окном перед решеткой *A*. Свинцовую камеру целиком закрывал толстый войлочный чехол. Кроме войлочного чехла между трубкой и решеткой размещались алюминиевая пластина толщиной 1 *мм* и два листа тонкого алюминия. Помимо этого над отверстием *H* можно было еще расположить свинцовый экран. Таким образом, когда отверстие было закрыто свинцовым экраном, гальванометр не давал отклонений, показывая этим, что тепловое действие вызывали лучи, падавшие на решетку, и только одни они.

На практике было найдено, что применяемый чувствительный астатический гальванометр необходимо отнести от индукционной катушки на значительное расстояние, прежде чем можно будет пренебречь ее магнитным влиянием. Это приводит к удлинению проводов и в результате затрудняет балансировку моста. Однако в основном нарушения баланса происходили постепенно и в случае необходимости его можно было точно поправить в течение того короткого времени, когда сетка освещалась лучами.

Для работы требовалось два экспериментатора: один, чтобы включать и выключать трубку и отмечать отклонения электрометра, второй, чтобы наблюдать показания гальванометра. С помощью простой системы сигналов опыты не представляли серьезной трудности.

Чтобы интенсивность лучей, падающих на решетку, была по возможности постоянной, отверстие в свинцовой пластине между трубкой и решеткой в течение первых 15 *сек* после включения лучей закрывалось свинцовым экраном, управляемым на расстоянии. Экран быстро отодвигался с помощью шнура, а лучи выключались спустя определенное время путем прерывания тока.

Ниже дан пример записи серии наблюдений, длившихся несколько часов (время освещения лучами 30 *сек*; ток через решетки 0,04 *а*):

					Среднее значение
Отклонение гальванометра, *мм*	17,0	18,6	18,4	17,8	17,9
Отклонение электрометра в 1 *сек*, деления шкалы	5,17	5,53	5,33	5,27	5,32

Для измерения количества тепла, соответствующего этому отклонению гальванометра, через решетку, предварительно подвергнутую воздействию лучей, в течение того же времени пропускали постоянный ток от отдельной батареи.

На рис. 4 показана схема соединения. Поскольку было необходимо заметить отклонение прибора *немедленно после* прохождения тока в течение определенного времени, плечи моста не нарушались, а соответствующий нагревающий ток пропускался через решетку R_2.

Сопротивление решетки, освещенной лучами, $R_1 = 4{,}2$ *ом*; сопротивление второй решетки $R_2 = 4{,}28$ *ом*. Общее сопротивление двух других плеч и проводов $S = 23{,}04$ *ом*.

Если i — ток батареи, подводимый для подогрева решетки, то
ток через $R_1 = 0{,}867\ i$;
ток через $R_2 = 0{,}133\ i$;
тепловое действие на $R_1 = 0{,}752\ i^2$ *кал*;
тепловое действие на $R_2 = 0{,}018\ i_2$ *кал*;
разность количеств тепла, подводимых к R_1 и $R_2 = 0{,}734\ i^2$.

Итак, мы видим, что бóльшая часть теплового действия проявляется на сетке R_1.

Специальная серия опытов позволила установить, что показания гальванометра в какой-то момент вследствие нагрева током пропорциональны квадрату тока. Поэтому не было необходимости находить опытным путем точные значения тока, дающего такое же отклонение, что и лучи, а результаты можно было получить интерполяцией по наблюдению одного известного тока.

Оказалось, что при условиях, указанных в приведенной выше таблице, ток $i = 0{,}0200$ *а* дает среднее отклонение от нуля 37,4 деления за 30 *сек*. Среднее отклонение, обусловленное лучами, составляло 17,9 делений.

Таким образом, количество тепла, подводимое лучами к решетке за 1 *сек*, равно

$$\frac{17{,}9}{37{,}4}\cdot(0{,}02)^2\cdot 0{,}734 = 0{,}000141\ \textit{кал}.$$

На первом этапе исследований для измерения теплоты лучей применялся нулевой метод, но возникли неожиданные трудности, и мы от него отказались. Через решетки поддерживался неизменный ток от батареи и достигался баланс. В течение того времени, когда были включены лучи, часть тока через решетку шунтировалась сопротивлением известной вели-

чины. Шунтирующее сопротивление устанавливалось таким, чтобы не было изменения баланса сразу после выключения лучей и разрыва шунтирующей цепи.

Однако получить удовлетворительные результаты было трудно отчасти вследствие непостоянства интенсивности лучей, но главным образом за счет малой разницы теплового эффекта на обеих решетках при равных токах. Обычно ток через решетку составлял 0,04 *а*, и при таком токе, когда он включался на некоторое время, неодинаковость решеток сразу проявлялась в изменении баланса. Добавление шунта к одной из решеток вызывало изменение тока через обе решетки, а изменение температуры, обусловленное их неодинаковостью, вводило ошибку, которой нельзя было пренебречь по сравнению с малым тепловым действием лучей. Метод не был таким быстрым и надежным, как примененный позднее.

Измерение теплового действия термопарами

Было проведено несколько опытов, чтобы посмотреть, не пригодны ли термопары для измерения теплового действия X-лучей. В лаборатории имелись только термостолбики обычного массивного типа из 65 висмуто-серебряных пар. Термостолбик был помещен в металлическую трубу, закрытую с одного конца алюминием, а с другого — пластиной каменной соли. На чувствительном низкоомном гальванометре можно было получить отклонение в 15 *мм* за 30 *сек*. Скорость подвода тепла была прокалиброванa с помощью стандартной лампы Гефнера, полное излучение которой определил Тумлирц [3] абсолютным методом. Оказалось, что термостолбик, освещенный X-лучами, достигает своей конечной температуры значительно медленнее, чем при освещении лампой, и что результаты значительно отличаются от болометрического метода. Причина расхождений заключается в непригодности массивного термостолбика для измерений X-лучей. Излучение от лампы, падающее на покрытие из сажи термостолбика, поглощается поверхностью металла, тогда как X-лучи проникают на расстояние порядка 1 *мм*, прежде чем поглотится большая часть энергии. Вследствие этого максимальный подъем температуры у поверхности спая, от которого зависит э. д. с., в случае X-лучей меньше, чем в случае света при равных интенсивностях излучения. Следовательно, отклонение гальванометра для X-лучей меньше, чем для световых волн, несущих равную энергию.

Из этих соображений видно, что массивный тип термостолбика менее всего подходит для такой работы. Видоизмененная термопара из тонких листов металла, например из железа и константана, возможно, дала бы лучшие результаты и была бы проще в обращении, чем болометр. В тонких листах тепло вследствие диффузии распределялось бы равномерно по поперечному сечению и не возникало бы ощутимой погрешности. Однако этот метод вызывает еще и то возражение, что количество тепла должно быть откалибровано по известной лампе или источнику лучистой энергии.

Полная энергия лучей, испускаемых в секунду

Когда X-лучи падают на металлическую пластину, она нагревается и сразу возникает вопрос, правы ли мы, предполагая, что поглощенная металлом энергия лучей преобразовалась в пластине в тепло. Опыты Перрена, Саньяка и Дж. Дж. Томсона ясно показали, что при ударах X-лучей о твердое тело возникают вторичные лучи, ионизующие газ и действующие на фотопластинку. Эти вторичные лучи имеют гораздо менее проникающий характер, чем лучи, которые их возбудили, но вследствие легкости, с какой они поглощаются газом, количество ионизации в 1 $см^3$ газа около поверхности тела может быть больше, чем обусловлено прямыми лучами. Общее число ионов, созданных рассеянными лучами, в значительной мере зависит от плотности металла, а также от интенсивности падающих лучей. Общее число ионов, созданных при полном поглощении рассеянных лучей, обычно составляет лишь малую часть числа ионов, созданных при полном поглощении прямых лучей. Предполагая, что один ион в обоих случаях требует для своего образования одинакового расхода энергии, заключаем, что энергия рассеянных лучей есть лишь малая часть полной энергии падающих лучей.

Вторичные лучи возникают как в точках падения, так и в точках выхода лучей, падающих на решетку. Таким образом, тепловое действие лучей на решетку меньше тепла, эквивалентного энергии лучей, поглощенных решеткой, на величину энергии, израсходованную на возбуждение вторичных лучей. Поправка, вероятно, мала, и ею пренебрегли в этих опытах, но надо надеяться, что в последующих исследованиях ее величина будет определена.

У нас нет данных о том, что химическая энергия платины в какой-то степени изменяется при прохождении через нее лучей и, насколько верны наши современные знания, энергия задержанных лучей за вычетом энергии рассеянного излучения превращается в платине в тепло.

При наличии химических превращений, т. е. когда лучи падают на фотографическую пленку, тепловое действие не будет эквивалентно поглощенной энергии.

Рентген и другие исследователи показали, что интенсивность лучей, испускаемых передней поверхностью платинового анода фокусирующей трубки, приблизительно одинакова во всех направлениях. В нашем опыте лучи падали нормально на центр решетки, но вследствие ее размеров интенсивность нельзя было считать постоянной по всей поверхности решетки. Интенсивность лучей снижается, а угол падения их увеличивается от центра решетки к ее краям. В соответствии с этим на краях поглощается бо́льшая часть падающего излучения, чем в центре.

Интенсивность лучей при их прохождении перпендикулярно к решетке снижается приблизительно до 0,45 ее первоначальной величины. Приближенным интегрированием по поверхности решетки можно показать, что

при заданном расстоянии решетки от источника, т. е. 26 *см*, и при заданных размерах решетки фактически поглощенная энергия приблизительно на 2% меньше, чем в том случае, если бы интенсивность лучей по всей поверхности решетки была бы такой же, как в центре, и они падали бы нормально во все точки решетки.

Показано, что для примененной специальной трубки скорость притока тепла к решетке была равна 0,00014 *кал/сек*. Это соответствовало максимальному подъему температуры около 1/200° С.

Расстояние от центра решетки до источника лучей 26 *см*, площадь решетки 92,2 *см*^{2}. Сетка поглощает 0,55 падающего излучения.

Полная энергия лучей, падающих на решетку, приблизительно равна 0,00025 *кал/сек*. Поэтому полный тепловой эффект, обусловленный всеми лучами, испускаемыми передней стороной пластины (исключая поглощение стеклом, воздухом и экранами), равен

$$\frac{2\pi\cdot(26)^2}{92,2}\cdot 0,98\cdot 0,00025 = 0,011 \text{ кал/сек, или } 0,046 \text{ вт.}$$

Число разрядов в 1 *сек* достигало 57; Троутон [4] показал, что продолжительность излучения в течение каждого разряда индукционной катушки менее 10^{-3} *сек*, вероятно, около 10^{-4} *сек*. Предполагая, что средняя продолжительность испускания лучей в течение каждого разряда равна 10^{-4} *сек*, получаем, что скорость излучения энергии, пока длится разряд, составляет 1,95 *кал/сек*. Тепловой эффект солнечных лучей, падающих нормально на поверхность в 1 *см*^{2}, составляет около 0,035 *кал/сек*.

Таким образом, максимальная скорость излучения энергии X-лучей из трубки примерно в 56 раз больше количества энергии на 1 *см*^{2}, обусловленного солнечными лучами.

Эффективность флуоресцирующего экрана как источника света

Были проведены опыты по определению эффективности флуоресцирующего экрана как преобразователя рентгеновского излучения в видимый свет.

Фотометрические исследования света, излучаемого флуоресцирующим экраном при возбуждении X-лучами, провел Моффат [2], который получил значение энергии лучей, предположив, что коэффициент преобразования энергии в видимый свет равен 4% - величине, найденной Видеманом [5] для преобразования лучистой энергии в люминесценцию.

Мы не ставили себе целью этим исследованием провести полное фотометрическое сравнение, было решено лишь вывести приблизительный коэффициент преобразования для определенной опытной установки, которая легко может быть воспроизведена на практике. Для этого часть флуоресцирующего экрана была положена на одну из матовых поверхностей экрана Люмера — Бродхуна, и рассеянный свет экрана сравнивался

обычным способом с рассеянным светом амиловой лампы. Отношение квадрата расстояния от экрана до трубки к квадрату расстояния до лампы было принято за отношение интенсивностей света, возбужденного рентгеновской трубкой и лампой. Поглощение света нормальной лампы гипсовой поверхностью мы не учитывали.

Сампнер [6] показал, что кусок промокательной бумаги отражает свыше 80% падающего на него света, а экспериментально было установлено, что гипсовая поверхность экрана представляет собой еще лучший отражатель.

Во время измерений энергии, а также во время сравнения экрана с нормальной лампой определялось абсолютное значение тока в разрядной камере, чтобы скорректировать изменение интенсивности лучей во время наблюдения. Для экрана с платино-цианистой солью бария

$$\frac{\text{Интенсивность света от флуоресцирующего экрана}}{\text{Интенсивность света от амиловой лампы}} = 0{,}0206.$$

Далее, если интенсивность видимого света I от нормальной лампы Гефнера выражается как $I = K/r^2$, а, как известно из опытов Тумлирца [2], значение K для видимого света равно 0,00361 *кал/сек*, то полная энергия, испускаемая лампой, в 41,1 раза больше энергии только светового излучения.

Итак, в опытах с болометром тепловое действие лучей, падающих на решетку площадью 92,2 *см*^{2} на расстоянии 26 *см* от источника лучей той же интенсивности, что и лучей, падавших на флуоресцирующий экран, составляло 0,00032 *кал/сек.*

Следовательно, $I = K/r^2$ и величина K, представляющая собой количество лучистой энергии, падающей перпендикулярно на поверхность в 1 *см*^{2} на расстоянии 1 *см* от источника лучей, равна 0,0023 *кал.*

Таким образом, интенсивность X-лучей составляет 0,64 интенсивности видимого света нормальной лампы Гефнера.

Далее, эффективность преобразования X-лучей в свет равна

$$\frac{\text{Энергия, излученная в виде света}}{\text{Энергия, подведенная лучами}} = \frac{0{,}0206 \cdot 0{,}00361}{0{,}73 \cdot 0{,}0023} = 0{,}044,$$

так как с помощью электрического метода было найдено, что 0,73 лучей поглощается экраном.

Таким образом, эффективность преобразования составляет 4,4%.

Если предположить, что от поверхности экрана Люмера — Бродхуна отражается 85% падающего света, то эффективность преобразования составит около 3,7%. Экран из вольфрамовокислого кальция, который поглощал 0,36 лучей, дал почти тот же коэффициент преобразования.

Полученные результаты позволяют простым способом выразить абсолютную интенсивность X-лучей, положив коэффициент преобразования флуоресцирующего экрана равным около 4%.

Необходимы были бы два опыта:

1. Сравнить интенсивность света от экрана с нормальной лампой Гефнера.

2. Измерить электрическим или фотометрическим способами поглощение лучей экраном, поместив часть экрана так, чтобы он поглощал лучи.

Обозначим через I_1 и I_2 абсолютные значения интенсивности X-лучей и нормальной лампы Гефнера, пренебрегая поглощением лучей стеклом, металлическими экранами, воздухом и т. п. Обозначим через r_1 и r_2 расстояния источника лучей и лампы от экрана Люмера — Бродхуна при достижении равенства освещенностей.

Пусть r_1 и r_3 обозначают расстояния при равных освещенностях в случае, когда лучи проходят через часть экрана, прежде чем попасть на экран. Тогда ρ — отношение прошедших лучей к падающим для флуоресцирующего экрана выражается как

$$\rho = \frac{r_2^2}{r_3^2}.$$

Отношение падающей энергии к поглощенной равно $1 - \rho$. Следовательно, легко видеть, что

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2(1-\rho)} \cdot \frac{100}{4{,}4},$$

так как эффективность равна 4,4%.

Таким образом, поскольку $I_2 = 0{,}00361$ *кал*, то

$$I_1 = 0{,}082 \frac{r_1^2}{r_2^2(1-\rho)} \text{ кал.}$$

Итак, потребовались бы два простых фотометрических сравнения, чтобы выразить абсолютное значение энергии излучения любой данной трубки.

Поглощение проникающих лучей картонным экраном незначительно, однако при необходимости на это легко можно сделать поправку.

Основная причина трудности сравнения лежит в разнице цвета лампы Гефнера и флуоресцирующего экрана. Флуоресцентный свет кажется зеленовато-голубым, а свет лампы Гефнера — красновато-желтым, когда они видны рядом в зрительной трубе фотометра Люмера — Бродхуна.

Чтобы источники света более соответствовали по цвету, были проделаны некоторые опыты с применением цветного стекла. Оказалось, что стекло, окрашенное в зеленоватый цвет, дает хорошую цветовую пару, если поместить его между экраном и нормальной лампой. При определении с помощью термопары количества энергии видимого света от лампы Гефнера, прошедшего через стекло, его оказалось настолько мало (меньше 2%), что для точного определения коэффициента пропускания требуется специальное исследование. Опыты не были продолжены вследствие недо-

статка времени, но результаты показывают, что при применении окрашенного фильтра на пути лучей нормальной лампы для создания того же оттенка, что у флуоресцентного экрана, эффективность преобразования оказывалась намного больше 4% — значения, полученного при использовании неокрашенного стекла или раствора.

Энергия, необходимая для образования одного иона

Метод, примененный для определения энергии, необходимой для образования одного иона в газах, подвергшихся рэнтгеновскому облучению, основан на измерении теплового действия лучей и общего числа ионов, созданных при облучении газа. Если H — число калорий, приносимых лучами за 1 *сек*, а E — энергия лучей (в *эрг*), испускаемых в 1 *сек*, то

$$E = JH. \qquad (1)$$

Если W — среднее количество энергии, необходимое для образования одного иона, то

$$nW = E, \qquad (2)$$

где n — число ионов, образующихся в 1 *сек*, в предположении, что вся энергия лучей, поглощенная газом, израсходована только на создание ионов.

Чтобы определить количество ионов n, необходимо измерить максимальный ток, который может быть получен между двумя элктродами, когда все ионы, созданные лучами в газе, достигнут разрядных электродов до того, как потеря их числа, обусловленная рекомбинацией, станет ощутимой. Если i — максимальный ток, или ток *насыщения* через газ, то

$$i = n\varepsilon,$$

где ε — заряд одного иона.

Величина ε была определена Дж. Дж. Томсоном [7] и равна $6{,}5 \cdot 10^{-10}$ *эл.-стат. ед.*

Из (1) и (2) получается

$$nW = JH,$$

поэтому

$$W = \frac{JH\varepsilon}{i}.$$

Следовательно, чтобы определить W, необходимо найти значения H и i.

Этот метод основан на таких соображениях:

1) если X-лучи поглощаются твердым телом, то бо́льшая часть энергии передается веществу в виде тепла;

2) энергия лучей, поглощенная при прохождении через заданный объем газа, расходуется на ионизацию.

Первое соображение обсуждалось уже в этой статье, и было показано, что, по-видимому, мы правы, предполагая, что бо́льшая часть энергии лучей, поглощенных веществом, подобным платине, преобразуется в тепло. Меньшая часть полной энергии используется на возбуждение вторичных лучей в месте падения лучей на твердый проводник, а также в месте их выхода из него.

Что касается второго соображения, то один из авторов настоящей работы ранее показал [8], что поглощение лучей газом приблизительно пропорционально интенсивности ионизации газа. Газы и пары, превращающиеся под действием лучей в хорошие проводники, также сильно поглощают их. Нет непосредственной связи между поглощением лучей газом и молекулярным весом или плотностью газа. Например, хлористый водород поглощает лучи гораздо легче, чем углекислый газ, обладающий большей плотностью.

Перрен показал, что ионизация газа приблизительно пропорциональна давлению. Этот результат был нами подтвержден, и мы нашли, кроме того, что поглощение лучей изменяется пропорционально давлению, т. е. так же, как и ионизация. Эти результаты приводят к выводу, что поглощение лучей газом тесно связано с числом созданных ионов. Возможно, что при прохождении лучей через газ имеется какое-то рассеяние, но даже если бы явное поглощение лучей было обусловлено в какой-то мере рассеянием, следовало бы ожидать, что поглощение зависит главным образом от плотности газа, а этого нет. Рентген и другие исследователи установили, что сам газ под действием лучей испускает излучение, способное вызвать свечение флуоресцирующего экрана. Это излучение может быть вызвано либо рассеянием лучей, либо излучением вследствие рекомбинации ионов. В любом случае возможно, что это излучение подобно вторичному излучению, возникающему на поверхности металла при падении на него X-лучей. Это вторичное излучение гораздо легче поглощается газами, нежели первичное, и при образовании ионов в газе было бы поглощено. При этом скорость разряда возросла бы и при условии, что все запасенное рассеянное или вторичное излучение израсходовалось бы на образование новых ионов между электродами, не потребовалось бы вводить поправки на рассеянное излучение. Это, конечно, происходит лишь в том случае, если ионы, создаваемые первичным и вторичным излучениями, одинаковы и на их образование в обоих случаях требуется одно и то же количество энергии.

Практически невозможно непосредственно измерять полный максимальный ток через газ, обусловленный прохождением между заряженными электродами всех созданных ионов, так как лучи в газе могут пройти несколько сотен метров, прежде чем произойдет приблизительно полное поглощение. Практически определяется число ионов, созданных в небольшом объеме газа, и коэффициент поглощения лучей газом. Поэтому полное

число ионов, которое будет создано, если все лучи окажутся поглощенными, может быть легко подсчитано.

Приведем теперь описание опытов по измерению поглощения лучей газами.

Поглощение лучей газами

Используемая трубка давала лучи большой интенсивности и проникающей способности, а поглощение лучей воздухом было незначительным. Около 3% лучей поглощалось, проходя через 1 *м* воздуха при атмосферном давлении и комнатной температуре. Для измерения поглощения применялся чувствительный нулевой метод. Ни один прямой метод не мог быть использован вследствие незначительности поглощения и изменения интенсивности лучей в течение опыта.

На рис. 5 приведена общая схема установки. Подобный метод был применен одним из нас раньше при измерении поглощения лучей газами [8].

Две длинные латунные трубы A и A' длиной 118 *см* и диаметром 3,4 *см* были помещены горизонтально под небольшим углом одна к другой и в таком положении относительно рентгеновской трубки, чтобы оси обеих труб встречались в одной точке на поверхности платиновой пластины антикатода. Концы труб были накрыты алюминиевыми колпачками толщиной 1 *мм* и были сделаны герметичными, способными противостоять давлению в 3 *атм*. Скорости разрядов, обусловленных лучами после прохождения через трубки, измерялись между двумя рядами параллельных пластин CD и $C'D'$. Пластины D и C', одинаковые по размеру, были разрезаны на три части, из которых средние тщательно изолировались. Таким образом, средние пластины были окружены защитным кольцом, и измерялись скорости разрядов только на средних пластинах. Средние пластины D и C' были соединены между собой и с одной парой квадрантов электрометра, другая пара квадрантов была заземлена. Пластины C и D' были соединены с зажимами аккумуляторной батареи на 310 *в, средняя точка которой была заземлена*. Если интенсивность лучей между C и D точно равна интенсивности между C' и D', электрометр не дает отклонения, поскольку ток между C и D равен и направлен навстречу току между C' и D'.

Для предотвращения попадания на измерительные пластины любого случайного излучения в положениях, отмеченных на рисунке, были помещены свинцовые экраны L, M и N. Проволоки, идущие к электрометру, были заключены в заземленные металлические трубки, во избежание потери заряда вследствие случайного излучения или возмущения каким-либо электростатическим полем. Электрометр был целиком защищен проволочной сеткой. Регулировка квадрантов электрометра производилась на расстоянии посредством соответствующих ключей. Такие предосторожности были совершенно необходимы, ибо зима в Канаде очень сухая и малейшее движение вызывает электризацию трением. Стол и деревянные подставки, на которых размещалась аппаратура, были покрыты ме-

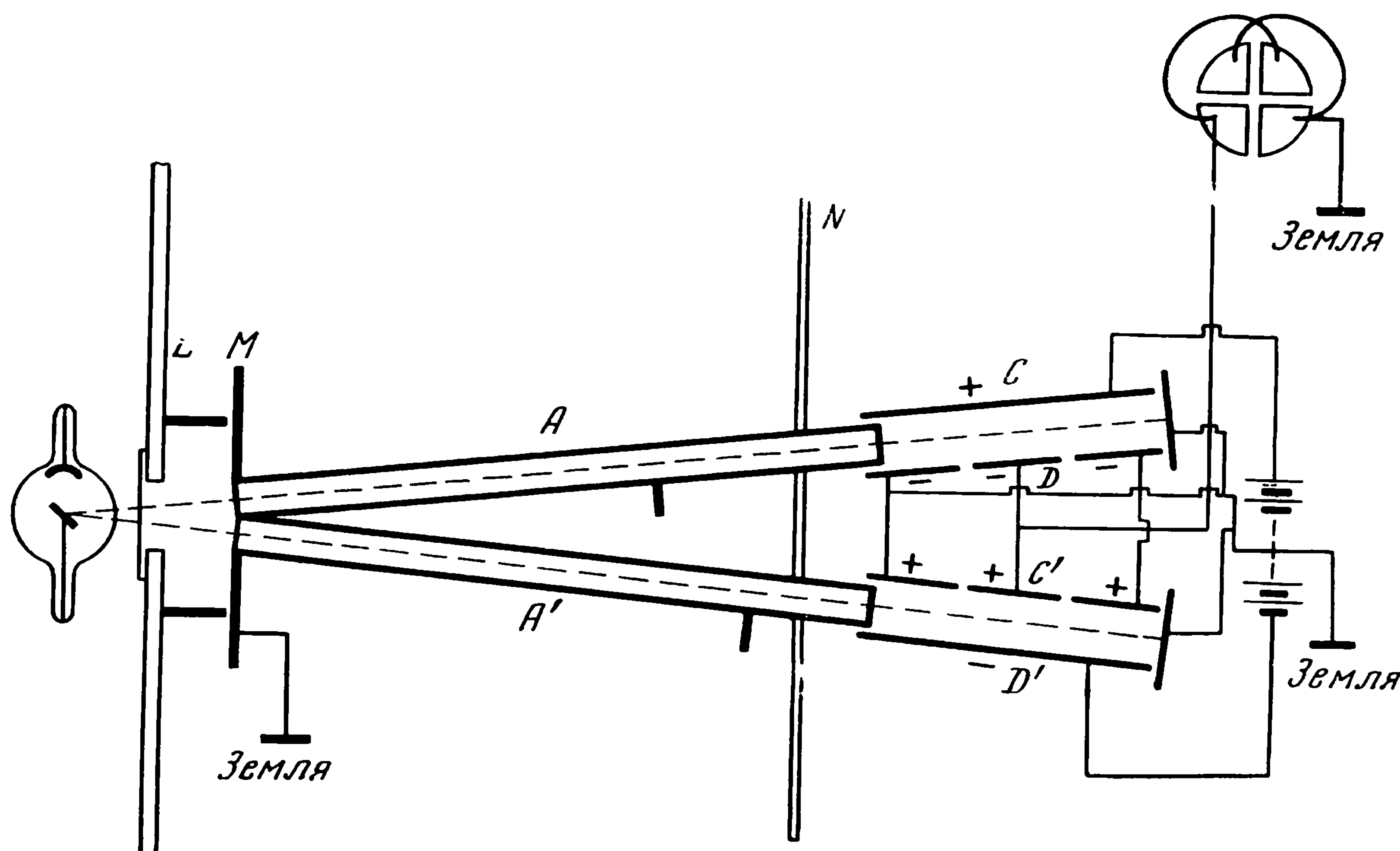


Рис. 5

таллом, чтобы предотвратить накапливание зарядов как от электризации трением, так и от действия лучей вблизи заряженных проводников.

Сначала трубы были установлены так, что лучи не вызывали движения стрелки электрометра. Потом из трубы A насосом Флеша быстро откачивался воздух. Интенсивность лучей при выходе из этой трубы стала больше, чем из трубы A' за счет меньшего поглощения, поэтому стрелка электрометра отклонилась. Если откачивалась труба A', а труба A наполнялась воздухом, то электрометр давал отклонение в противоположную сторону. Если конец одной из труб закрывался толстой свинцовой пробкой, так что лучи не могли проходить сквозь нее, скорость движения стрелки электрометра соответствовала интенсивности лучей I при выходе из второй трубы.

Если λ — коэффициент поглощения лучей газом, то интенсивность лучей, после того как они прошли в трубе расстояние d, равна $e^{-\lambda d}$ ее величины, при условии, что не было поглощения.

Поскольку токи между C и D и между C' и D' пропорциональны интенсивности излучений между пластинами, то

$$\frac{\text{Разность токов}}{\text{Полный ток}} = \frac{I - Ie^{-\lambda d}}{I} = 1 - e^{-\lambda d} = \lambda d,$$

если λd мало.

Таким образом, чтобы определить λd, нам нужно знать отношение числа делений в секунду, даваемое стрелкой электрометра, когда одна из труб откачана, к числу делений в секунду, когда конец трубы, содержащей газ, закрыт толстой свинцовой пробкой.

Ниже даны результаты, полученные для поглощения лучей в воздухе, когда давление в одной из труб изменялось от 0,5 до 3 *атм*, а другая была откачана:

Разница давлений, *атм*	0,5	1	2	3
Число делений за 5 *сек*, когда одна труба закрыта свинцовой пробкой	—	160	169	172
Отклонение стрелки от равновесного положения за 20 *сек*	—	21,8	48,0	70,0
λd	0,0187	0,034	0,071	0,102

Здесь приведены средние результаты из серии измерений. Результаты для 0,5 *атм* были получены в другое время и с другой чувствительностью электрометра. Приведенные данные показывают, что поглощение лучей газом приблизительно пропорционально давлению.

Значение d составляло 118 *см*. Значения λ для разных давлений приведены ниже:

Давление, *атм*	0,5	1	2	3
λ	0,000158	0,000288	0,00060	0,00086

Величина λ при атмосферном давлении и комнатной температуре, полученная для той же трубы после ежедневного использования в течение 2 месяцев, оказалась равной 0,000270. Для расчетов при атмосферном давлении и комнатной температуре за величину λ принималось среднее из этих двух значений:

$$\lambda = 0{,}000279.$$

Возможно, что лучи не были однородными и значение λ следовало бы рассматривать как среднее для различного рода лучей. Вследствие незначительного поглощения лучей трудно было точно определить поглощение при давлениях ниже 0,5 *атм*. Однако результаты показывают, что поглощение было приблизительно пропорционально давлению и при более низких давлениях.

Величина λ была определена для углекислого газа при нормальных давлении и температуре. Поглощение было в 1,59 раз больше поглощения воздухом, а значение λ оказалось равным 0,000457. Результаты были подтверждены изменением давления в одной из труб, пока электрометр не показал нуля. Они сходились с полученными ранее, если считать, что поглощение воздухом пропорционально давлению.

Из приведенных выше результатов мы видим, что излучение ослабляется вдвое без поглощения твердыми веществами, проходя через воздух при обычных давлении и температуре расстояние в 24,7 *м*.

Величина λ для лучей урана равна 1,6 [9], т. е. поглощение лучей урана в 6000 раз больше, чем использованных в опытах X-лучей. Значение λ, полученное несколько лет тому назад для более «мягкой» трубки, равнялось 0,001, или в 4 раза больше, чем для трубки, используемой в описываемых опытах.

Измерение тока в газе

Чтобы определить количество ионизации в известном объеме газа, был применен прибор, показанный на рис. 6.

Лучи входили в латунный цилиндр диаметром 12 *см* и длиной 30 *см* через прямоугольное отверстие *O* в одном торце, которое было закрыто алюминиевым окном толщиной 1 *мм*. Внутри цилиндра, на легком деревянном каркасе были закреплены две параллельные прямоугольные пластины *A* и *BCD*. Пластина, расположенная напротив *A*, была разрезана на три части *B*, *C*, *D*, причем часть *C* была изолирована от частей *B* и *D*. Пластина *A* была соединена с одним полюсом батареи на 310 *в*, второй полюс которой был заземлен. Пластина *C* была соединена с одной парой квадрантов электрометра, вторая пара была заземлена. Пластины *B* и *D* были соединены с цилиндром, тоже заземленным. Таким образом, пластины *B* и *D* служили для пластины *C* неполным защитным кольцом и отвечали двум целям. Электрическое поле между *C* и *A* стало однородным, и большая часть вторичного излучения, возникающего на обоих концах цилиндра, поглощалась между *A* и *B* и между *A* и *D* и поэтому не создавала заметной ионизации между *A* и *C*. Большая свинцовая пластина *L* с прямоугольным отверстием была поставлена так, что лучи от источника проходили в цилиндр, но не падали на параллельные пластины. Это предотвращало появление вторичного излучения. Изнутри оба торца цилиндра были покрыты картоном, чтобы по возможности уменьшить вторичное излучение. Количество излучения, возникающего на границе воздуха и картона, очень мало. Количество изоляционных материалов внутри цилиндра было, по возможности, уменьшено, чтобы избежать

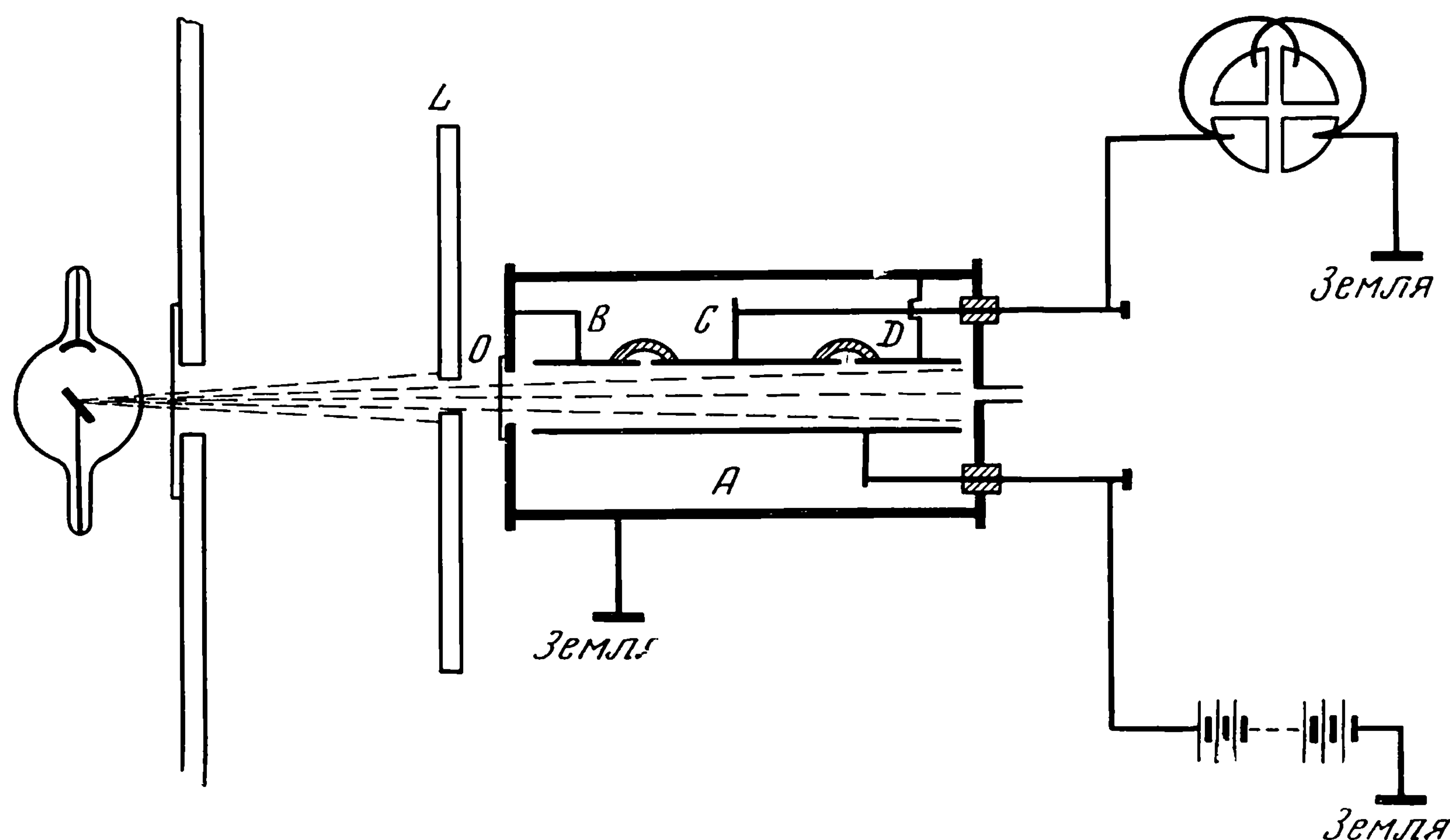


Рис. 6

накапливания на них свободных зарядов, и в результате — искажений электрического поля. По этой причине пластины были смонтированы не на эбонитовом каркасе, а на деревянном. Дерево было достаточно хорошим проводником, чтобы быстро разряжать любую наэлектризованность, возникшую на его поверхности.

Таким образом, ток между C и A обусловлен только ионами, возникающими при прохождении лучей между ними.

Длина пластины C, измеренная между центрами воздушных промежутков, составляла 12,06 *см*. Расстояние между пластинами было 4,16 *см*. Перед входом в цилиндр лучи проходили через прямоугольное отверстие в толстой свинцовой пластине. Зная расстояние от источника лучей и площадь отверстия, можно определить площадь поперечного сечения пучка для любой точки в цилиндре.

Результаты, вычисленные таким способом, сравнивались с площадью изображения на фотопластинке при разных расстояниях от отверстия; оказалось, что поправка на конечный размер источника практически ничтожна.

Пусть I_2 — интенсивность лучей у начала пластины C, а S — площадь поперечного сечения пучка лучей в этой точке. Энергия, проходящая через эту плоскость в 1 *сек*, равна I_2S.

Если бы газ не поглощал энергии, то прошедшая через поперечное сечение пучка лучей энергия у дальнего конца пластины C была бы такой же, как у ближнего конца. Но вследствие поглощения энергия, проходящая в 1 *сек* через эту плоскость, равна

$$I_2Se^{-\lambda l},$$

где l — длина пластины C; λ — коэффициент поглощения лучей газом. Энергия, поглощенная газом за 1 *сек*, равна

$$I_2S(1 - e^{-\lambda l}) = I_2S\lambda l,$$

если λl мало, как было в этих опытах.

Ток между пластинами A и C определялся напряжением, достаточным для движения всех ионов к электродам, прежде чем возникнет сколько-нибудь ощутимая рекомбинация.

Пусть n — полное число ионов, возникающих в 1 *сек*; i — ток в газе между пластинами; e — заряд одного иона; W — средняя энергия, необходимая для создания одного иона. Тогда

$$Wn = I_2S\lambda l, \quad i = ne,$$

т. е.

$$W = \frac{I_2S\lambda le}{i}.$$

Величина I_2 определялась по тепловому действию лучей способом, описанным выше.

Пусть I_1 — интенсивность лучей на поверхности болометра; ρ_1 — коэффициент прохождения лучей через платиновую решетку.

Тогда энергия, поглощенная решеткой в 1 *сек*, равна I_1A $(1 - \rho_1)$, где A — площадь решетки.

Предполагая величину интенсивности однородной по всей поверхности решетки и равной ее значению в центре, получаем, что полная энергия, поглощенная решеткой, намного меньше, чем подсчитано выше, а раньше в этой статье было показано, что энергия, поглощенная решеткой, весьма приблизительно равна $0{,}98\ I_1A\ (1 - \rho_1)$.

Практически ток в разрядной камере наблюдался одновременно с тепловым действием. Цилиндр был помещен за платиновой решеткой в таком положении, что лучи, входя в цилиндр, проходили немного в стороне от центра решетки, уклоняясь, таким образом, от слюдяной рамки болометра. Перед входом в цилиндр интенсивность лучей была ослаблена их прохождением через решетку войлочным чехлом и алюминиевым окном в разрядном цилиндре.

Пусть ρ_2 — коэффициент прохождения лучей через платиновую сетку + войлочный чехол + алюминиевое окно и т. д.; d_1 — расстояние от сетки до источника лучей; d_2 — расстояние от начала пластины C в разрядном цилиндре до источника лучей. Тогда легко видеть, что

$$\frac{I_2}{I_1} = \rho_2 \frac{d_1^2}{d_2^2} e^{-\lambda (d_1 - d_2)}. \tag{1}$$

Множитель $e^{-\lambda(d_1-d_2)}$ почти равен единице; это поправка на поглощение лучей газом между сеткой и разрядным цилиндром.

Если H — число единиц тепла, полученных болометром в 1 *сек*, то

$$0{,}98AI_1(1 - \rho_1) = JH; \tag{2}$$

$$W = \frac{I_2 S\lambda le}{i}. \tag{3}$$

Разделив (3) на (2) и подставив значение I_2/I_1 из (1), получаем

$$W = \frac{JH}{0{,}98A\,(1 - \rho_1)} \frac{S\lambda le}{i} \rho_2 \frac{d_1^2}{d_2^2} e^{-\lambda (d_1 - d_2)}.$$

Определение i

Значение i определялось электрометром с включенной параллельно с ним добавочной емкостью 0,00248 *мкф*. Одновременно наблюдались тепловое действие по болометру и количество электричества, разрядившееся между пластинами цилиндра. Свинцовый экран отсекал лучи от

платиновой решетки и разрядного цилиндра в течение 15 *сек* после включения трубки, так как оказалось, что интенсивность лучей постепенно возрастает в течение первых 10 или 15 *сек*. По истечении 15 *сек* свинцовый экран быстро отодвигался с помощью шнурка, управляемого с некоторого расстояния.

После прохождения лучей в течение 30 или 45 *сек* трубка выключалась. Отклонение от нуля болометра снимал один наблюдатель, а отклонение электрометра — другой. В более поздних опытах емкость электрометра и соединительных проводов составляла $^1/_{27}$ от дополнительной емкости, и полная емкость цепи равнялась 0,00257 *мкф*.

Ниже дан пример определения i в электростатических единицах.

Один элемент Кларка с э.д.с. 1,434 *в* дал 57,0 делений на шкале электрометра. Отклонение электрометра, обусловленное прохождением лучей в течение 30 *сек*, было равно 160 делениям. Количество электричества в 1 *сек*.

$$i = \frac{0{,}00257}{10^6} \cdot \frac{160}{30} \cdot \frac{1{,}434}{57} \cdot 3 \cdot 10^9 = 1{,}03 \text{ эл.-стат.ед.}$$

Определение поглощения лучей в болометре, алюминиевом окне и др.

Значения ρ_1 и ρ_2 определялись с помощью электрического метода с использованием разрядного цилиндра, изображенного на рис. 6. Скорость разряда в цилиндре наблюдалась в двух случаях: с решеткой, помещенной перед отверстием в свинцовой пластине, а потом без нее. Отношение токов в этих двух случаях пропорционально отношению интенсивностей, так как ионизация пропорциональна излучению. Было взято среднее значение отношения для разных частей решетки и оказалось, что $\rho_1 = 0{,}453$. Таким образом, стало ясно, что интенсивность излучения, проходящего через платиновую сетку, снижается немногим больше, чем наполовину. Аналогичным образом была определена и величина ρ_2. Интенсивность лучей в этом случае снизилась больше вследствие прохождения лучей через толщину войлока, алюминиевое окно толщиной 0,1 *см*, тонкий лист алюминия и через платиновую решетку. Для этого отношения было найдено значение $\rho_1 = 0{,}31$.

На значениях ρ_1 и ρ_2 сказывается поглощение лучей слюдяной рамкой. Однако это поглощение было мало и практически им в любом случае можно пренебречь.

Размеры аппаратуры и значения постоянных

Площадь прямоугольного отверстия, через которое лучи проходят в разрядный цилиндр, составляла 7,1 *см*^{2} и по этому значению подсчитывалась величина S. Длина центральной пластины в разрядном цилиндре равнялась 12,06 *см*. Для большей части опытов расстояние d от решетки до

источника лучей составляло 26,0 *см*, а расстояние от отверстия в свинцовой камере до источника 45,2 *см*.

Площадь платиновой решетки составляла 92,6 $см^2$, среднее значение $\lambda = 0{,}000279$, значение $e = 6{,}5\cdot10^{-10}$ *эл.-стат.ед.* Поправка на поглощение в воздухе между сеткой и разрядным цилиндром была пренебрежимо мала.

Ниже приведены значения i, H и W для разных времен действия лучей:

Время действия лучей, *сек*	45	45	45	45	45	30	30	30	30
i, *эл.-стат. ед.*	0,894	0,976	1,045	1,115	0,996	1,00	1,07	1,03	1,09
$H\cdot10^{-4}$, *кал*	1,4	1,56	1,47	1,57	1,38	1,34	1,47	1,45	1,41
$W\cdot10^{-10}$, *эрг*	2,22	2,13	1,87	1,82	1,84	1,79	1,83	1,87	1,72

Среднее значение энергии W, необходимой для образования одного иона в воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре, равно

$$W = 1{,}90\cdot10^{-10} \text{ эрг}.$$

Энергия, необходимая для образования одного положительного и одного отрицательного ионов из нейтральной молекулы, в 2 раза больше, и так как один ион не может быть получен без другого, то $3{,}8\cdot10^{-10}$ *эрг* — наименьшее количество энергии, которое может создать в воздухе ионы.

Среднее абсолютное значение интенсивности лучей на поверхности болометра выражается следующим образом:

$$JH = 0{,}98AI_1(1-\rho_1).$$

Приняв величину H равной $1{,}5\cdot10^{-4}$ *кал*, найдем

$$I = 127 \text{ эрг}.$$

Вследствие очень малой продолжительности разряда мгновенная максимальная интенсивность излучения, возможно, превышает указанное значение более, чем в 1000 раз.

Энергия, поглощаемая в 1 *сек* на образование ионов в цилиндре, равна $(i/\varepsilon)W = 0{,}29$ *эрг*, если принять $i = 1$ *эл.-стат.ед.* Это поглощение энергии происходит в объеме свыше 100 $см^3$ газа, так что поглощение энергии 1 $см^3$ воздуха очень мало.

Величина ионной энергии W очевидным образом зависит от измерений тока через газ, коэффициента поглощения и теплового действия лучей. Поглощение лучей газом должно быть определено отдельно от измерений тока и теплового действия, а поэтому возникает некоторая неопределенность из-за изменения проникающей способности лучей при замене трубки. Оказалось, что значение λ, определенное для лучей при разных частотах прерывателя Венельта, примерно остается тем же и после того, как трубкой непрерывно пользовались в течение нескольких месяцев.

Возможно, что тип лучей в среднем мало меняется ото дня ко дню, а наибольшую ошибку вносит предположение, что лучи однородны по составу. В опытах по поглощению лучей металлами Рентген и другие показали, что лучи имеют сложный состав и различаются проникающей способностью на несколько порядков, так что значение λ представляет собой среднее значение для разных типов лучей.

Величина W зависит также от величины заряда иона e, и, если бы в последующих исследованиях было получено другое значение e, пропорционально изменилось бы и значение W.

Энергия, необходимая для образования одного иона в других газах

Если известна энергия, необходимая для образования одного иона в каком-нибудь газе, то энергия, необходимая для образования одного иона в другом газе, может быть определена из отношения поглощения лучей и из интенсивности ионизации этих газов.

Пусть n_1 и n_2 — количество ионов, образующихся в 1 *см*^{3} в двух газах; λ_1 и λ_2 — соответствующие коэффициенты поглощения; W_1 и W_2 — энергии, необходимые для образования ионов в двух газах; i_1 и i_2 — токи насыщения через газы.

Тогда при одинаковой интенсивности лучей

$$\frac{\text{Поглощение энергии в газе 2}}{\text{Поглощение энергии в газе 1}} = \frac{\lambda_2 I}{\lambda_1 I} = \frac{n_2 W_2}{n_1 W_1} = \frac{i_2 W_2}{i_1 W_1},$$

так как $i_1 = n_1\varepsilon$ и $i_2 = n_2\varepsilon$, если положить заряды ионов равными. Следовательно,

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\lambda_2 i_1}{\lambda_1 i_2}.$$

Отношения λ_2/λ_1 и i_1/i_2 легко можно определить, и если W_1 известна, то W_2 может быть подсчитана без проведения в каждом случае опытов по тепловому действию.

Отношение λ_2/λ_1, коэффициентов поглощения углекислого газа и воздуха, для применяемых лучей оказалось равным 1,59, а отношение i_1/i_2, тока в воздухе к току в углекислом газе, при разности потенциалов 300 *в* найдено равным 1,43.

Следовательно, энергия, необходимая для образования одного иона двуокиси углерода, равна

$$\frac{1{,}59}{1{,}43} W_1 = 1{,}11 W_1 = 2{,}11 \cdot 10^{-10} \text{ эрг}.$$

Это значение немного больше, чем для воздуха. Измеренное значение i_2 тока в двуокиси углерода было несколько меньше тока насыщения,

так как применяемая э.д.с. была недостаточна для достижения всеми ионами пластин прежде, чем начнется рекомбинация. Поправка на это сделала бы значения для воздуха и двуокиси углерода почти равными.

Приняв для относительной ионизации значение 1,53, найденное Дж. Дж. Томсоном [10], получим почти те же значения ионных энергий.

Результаты, полученные для воздуха и двуокиси углерода, показывают, что энергия, необходимая для образования ионов, мало отличается для этих двух газов. Результаты, приведенные в предыдущей работе [8], показали, что поглощение Х-лучей газами приблизительно пропорционально произведенной ими ионизации. Отсюда следует, что энергия, необходимая для образования ионов в исследованных газах, приблизительно одна и та же.

Согласно результатам, полученным с излучением урана [9], общее количество ионов, образованных при полном поглощении излучения в воздухе, кислороде, водороде, углекислом газе, хлористом водороде и аммиаке, приблизительно одинаково. В этом случае получить результаты было намного легче, так как излучение почти полностью поглощалось в нескольких сантиметрах газа и ток насыщения в газе был мерой общего количества образовавшихся ионов.

Недавние результаты Макленнана [11] убедительно говорят о том же. В проведенных им опытах катодные лучи из разрядной трубки попадали в другой сосуд, где измерялся вызванный ими ток насыщения в разных газах. При постоянной интенсивности катодных лучей ток, т. е. общее количество образовавшихся ионов, не зависел от природы газа (при условии, что давление газа обеспечивало одинаковое поглощение лучей в каждом случае). Изучались следующие газы: воздух, водород, кислород, азот, окись углерода, закись азота; общее количество полученных в них ионов было приблизительно одним и тем же. Из этого предположения, что на образование ионов в этих газах расходовалась одинаковая доля энергии катодных лучей, заключаем, что энергия, необходимая для образования одного иона, одна и та же для всех газов.

Решительно все результаты по ионизации различных газов под действием рентгеновских, беккерелевых или катодных лучей приводят к выводу, что для образования одного иона любого газа требуется одна и та же энергия.

Изменение ионной энергии с давлением

Ранее в этой статье было показано, что при давлениях от 0,5 до 3 *атм* поглощение пропорционально давлению. Специальные исследования показали, что в тех же пределах интенсивность ионизации также приблизительно пропорциональна давлению. Это показывает, что при изученных давлениях ионная энергия не зависит от давления. Результаты изменения поглощения с давлением для уранового и ториевого излучений тоже приводят к этому же выводу [9, 12].

Чтобы окончательно установить такой общий закон, как независимость энергии образования одного иона от рода газа и его давления, потребуется большое число тщательно поставленных опытов. Можно считать, что полученные до сих пор результаты показывают, что такой закон только приблизительно верен. Мы намерены продолжить эти опыты с ионной энергией на других газах, помимо воздуха и углекислого газа.

Выводы из полученных результатов

Если ионы одного вида создаются в газе различными агентами, то, вероятно, чтобы создать ионы, во всех случаях должно быть поглощено одно и то же количество энергии. Единственный способ проверки, которым мы обладаем в настоящее время, это сравнить скорости ионов газа для градиента потенциала 1 *в/см*. Дж. Дж. Томсон показал, что заряд иона, созданного лучами Рентгена, вероятно, одинаков у водорода, воздуха, кислорода и углекислого газа, а согласно Таунсенду, он равен заряду иона водорода при электролизе воды [13]. Скорость ионов в данном электрическом поле зависит от ε/m — отношения заряда иона к его массе. Поэтому, если скорости ионов, созданных в одном и том же газе разными агентами, одинаковы, массы должны быть равны, так как заряды равны.

Недавно было показано [14], что ионы в «электрическом ветре» движутся в воздухе с той же скоростью, что и ионы, созданные лучами. Таким образом, энергия, затраченная на создание ионов, может быть подсчитана непосредственно.

Пусть i — ток в газе, обусловленный электрическим разрядом с проволочки или с острия.

Энергия, идущая на создание ионов, равна

$$nW = \frac{i}{\varepsilon} W,$$

где n — количество ионов, получаемых в 1 *сек*; ε — заряд,

Следовательно, пренебрегая рекомбинацией ионов:

$$\frac{\text{Энергия, необходимая для создания ионов}}{\text{Полная потеря энергии}} = \frac{\frac{i}{\varepsilon} W}{Vi} = \frac{W}{\varepsilon} \frac{1}{V},$$

где V — потенциал разряжающейся проволоки.

Если $V = 6000$ *в* $= 20$ *эл.-стат.ед.*, то часть полной потери энергии, затраченная на создание ионов, равна

$$\frac{1{,}90 \cdot 10^{-10}}{6{,}5 \cdot 10^{-10}} \frac{1}{20} = \frac{1}{69} \text{ приблизительно.}$$

Таким образом, вполне заметная часть подведенной энергии расходуется на создание ионов. Эта часть уменьшается с увеличением напряжения.

Расстояние между ионами в молекуле

Если мы предположим, что большая часть энергии, необходимой для создания одного положительного и одного отрицательного ионов из нейтральной молекулы, обусловлена работой на отделение ионов одного от другого против сил электрического притяжения, то мы можем немедленно составить приблизительную оценку расстояния между зарядами в молекуле.

Если предположить, что заряды являются точечными, то работа, затраченная на разведение зарядов $+\varepsilon$ и $-\varepsilon$ с расстояния r до бесконечности, равна ε^2/r. Если она равна энергии, необходимой для образования двух ионов, то

$$\frac{\varepsilon^2}{r} = 3{,}8\cdot 10^{-10},$$

так как $\varepsilon = 6{,}5\cdot 10^{-10}$, $r = 1{,}1\cdot 10^{-9}$ *см* приблизительно.

Средний диаметр атома, подсчитанный разными способами, составляет около $3\cdot 10^{-8}$ *см*. Это гораздо больше, чем величина, найденная для расстояния между ионами в молекуле. Эти результаты подтверждают теорию, выдвинутую Дж. Дж. Томсоном [15], что ионизация — это удаление отрицательного иона из молекулы, и что отрицательный ион — лишь малая часть массы атома. Предполагается, что положительный ион остается присоединенным к остатку молекулы. По этой теории следует ожидать, что расстояние зарядов одного от другого меньше диаметра атома.

Энергия, необходимая для создания иона в воздухе, гораздо больше энергии, необходимой для создания одного иона при электролизе воды. Если V (1,46 *в*) — наименьшая э.д.с., необходимая для разложения воды, то работа, затраченная на перемещение заряда ε, равна $V\varepsilon$. Таким образом, работа, затраченная на получение одного иона, равна $V\varepsilon$, или $(1{,}46/300)\cdot 6{,}5\cdot 10^{-10} = 3{,}16\cdot 10^{-12}$ *эрг*, или около $^1/_{60}$ от энергии, необходимой для создания одного иона в воздухе посредством X-лучей, так что ионы в воде находятся на расстоянии один от другого, равном удвоенному размеру атома.

Наименьший потенциал, необходимый для создания искры в воздухе

Как было показано, ионы в «электрическом ветре» в воздухе движутся с той же скоростью, что и ионы, созданные X-лучами. Возможно, что прохождению искры между двумя электродами предшествует образование ионов в газе и что эти ионы того же вида, что и ионы, созданные в воздухе X-лучами.

Пусть V — разность потенциалов между двумя электродами в воздухе, один из которых заземлен. Предположим, что образовалась пара ионов и она движется к электродам. На их образование затрачена энергия, рав-

ная $3{,}8\cdot10^{-10}$ *эрг*, тогда как энергия электрического поля уменьшилась на $V\varepsilon$. Энергия, необходимая для создания этих ионов, должна быть получена от электрической энергии системы. Для получения иона в согласии с законом сохранения энергии мы должны иметь V такой величины, чтобы $V\varepsilon$ было больше энергии, необходимой для создания пары ионов.

Иначе говоря,

$$V > \frac{3{,}8\cdot10^{-10}}{6{,}5\cdot10^{-10}}\ \textit{эл.-стат.ед.},$$

т. е.

$$V > 175\ \textit{в}.$$

Недавно Пис показал [16], что, как ни сближать электроды один с другим, невозможно получить искру в воздухе при напряжении ниже 300 *в*. Эта величина несколько больше найденной нами, но того же порядка. Стретт показал [16] недавно, что минимальная разность потенциалов для прохождения искры в чистом азоте около 251 *в*. Поскольку большая часть ионов в воздухе, вероятно, образуется из молекул азота, то эта величина еще лучше согласуется с нашей. Полученные результаты говорят о том, что невозможно образовать ион, а следовательно, и электрическую искру при разности потенциалов менее 175 *в*. Если бы энергия, необходимая для получения одного иона, была одной и той же для всех давлений, то минимальный искровой потенциал по изложенной выше теории тоже был бы неизменным. Это подтверждено результатами Писа [16], который показал, что минимальная разность потенциалов для искры между сферическими электродами, разведенными один от другого приблизительно на 0,001 *см*, одна и та же для давлений от 300 до 50 *мм* рт. ст. При давлении ниже 50 *мм*. рт. ст. минимальный потенциал возрастает, показывая, что ниже этого давления необходимая для образования одного иона энергия может увеличиваться.

И наоборот, по этой теории можно предположить, что минимальный потенциал, необходимый для получения искры, может быть использован как средство определения энергии образования одного иона. Однако это явление сложнее, чем было показано. На минимальный искровой потенциал в какой-то степени влияют и металл, примененный для электродов, и газ; кроме того, остается необъясненным тот интересный факт, что при малом расстоянии между электродами искра проходит не по кратчайшему расстоянию между ними.

Энергия излучения радиоактивных веществ

В одной из предыдущих статей было показано, что ионы, созданные в воздухе излучением урана, имеют ту же скорость, что и ионы, созданные лучами Рентгена. Предположив, что для образования ионов как под действием лучей Рентгена, так и под действием лучей, испускаемых ураном, тре-

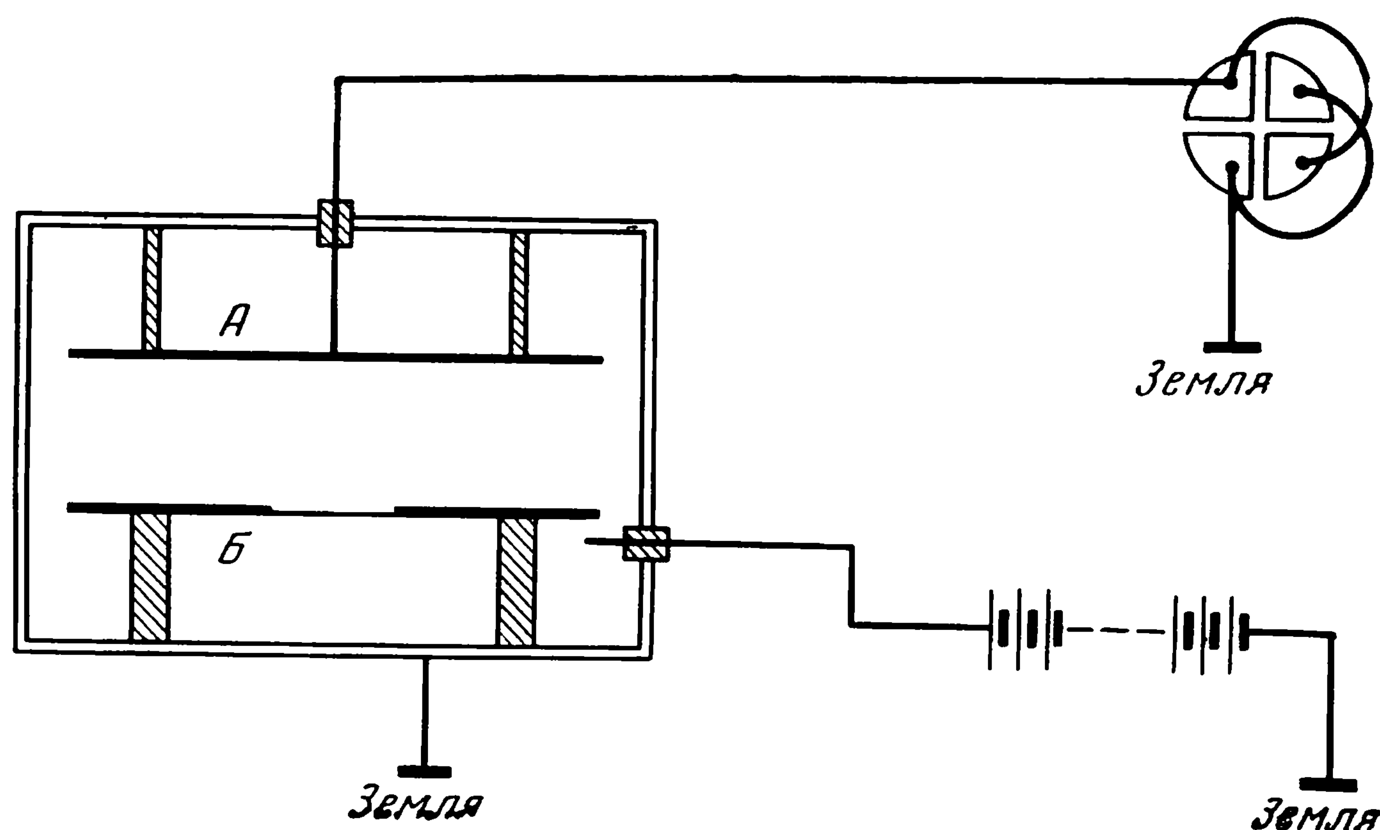


Рис. 7

буется одинаковая энергия, сразу можно определить энергию излучения, переданную газу. На рис. 7 показана схема установки для определения тока в воздухе, созданного лучами урана.

Две большие параллельные пластины A и B находятся на расстоянии 4,1 *см* одна от другой и хорошо изолированы. Пластина A была соединена обычным способом с электрометром, а пластина B — с одним полюсом батареи из малых элементов на 310 *в*. Используемая окись урана находилась в квадратном углублении, вырезанном в свинцовой пластине, положенной на пластину B. Ток между A и B определялся при разности потенциалов 310 *в*, практически достаточной для удаления всех ионов до рекомбинации.

Поскольку площадь урановой поверхности мала по сравнению с площадью пластин, между которыми расположен уран, полная энергия, излучаемая в 1 *сек*, поверхностью S урана, приблизительно равна IS, где I — интенсивность излучения на поверхности урана.

Если λ — коэффициент поглощения лучей воздухом, а W — энергия, необходимая для создания одного иона, то энергия, поглощенная в 1 *сек* между пластинами на расстоянии d одна от другой, равна

$$IS\{1 - e^{-\lambda d}\} = nW = \frac{i}{\varepsilon}W,$$

где n — количество ионов, создаваемых в 1 *сек*; i — ток; ε — заряд одного иона.

Полная энергия, излучаемая в 1 *сек*, равна

$$\frac{iW}{\varepsilon(1 - e^{-\lambda d})}.$$

Как было показано [9], уран, по-видимому, испускает два типа лучей, один из которых легко поглощается воздухом. Вообще ионизация, обусловленная более проникающими лучами, составляет лишь малую часть общей, особенно от тонких слоев урана, так что в настоящем расчете мы примем во внимание только энергию, затраченную ураном на создание более поглощаемого типа излучения.

Интенсивность испускаемого ураном излучения падает вдвое после прохождения 4,3 *мм*. Следовательно, $\lambda = 1{,}6$. Поскольку $d = 4{,}1$, то $e^{-\lambda d}$ мало, и им можно пренебречь.

Итак, энергия, затраченная в воздухе, равна $(i/\varepsilon)\,W$. Далее, для толстого слоя окиси урана (3,6 *г* распределены по площади 38 *см*²) ток $i = 0{,}0515$ *эл.-стат. ед.* Следовательно, энергия, излучаемая единицей площади поверхности урана в 1 *сек*, равна

$$\frac{0{,}0515}{6{,}5\cdot 10^{-10}\cdot 38}\cdot 1{,}90\cdot 10^{-10} = 0{,}0004\ \text{эрг} = 10^{-11}\ \text{кал/сек приблизительно.}$$

Этого количества энергии было бы достаточно для нагревания 1 *см*³ воды на 1° С *приблизительно за 3000 лет* при условии, что не было бы излучения тепла.

Трудно определить полную энергию, излучаемую данным весом урана, вследствие той легкости, с которой излучение поглощается самим ураном — тяжелым металлом, проходя через него. Было проделано несколько опытов по определению тока, обусловленного данной поверхностью окиси урана при разной толщине распределенного активного материала. Приведем некоторые результаты (поверхность окиси урана 38 *см*³):

Вес окиси урана, *г*	0,138	0,365	0,718	1,33	3,63
Ток в 1 *сек*, *эл.-стат. ед.*	0,0201	0,0365	0,0471	0,0515	0,0560

Окись урана в виде тонкого порошка была равномерно рассыпана с помощью тонкого проволочного сита. Эти результаты показывают, что ток, отнесенный к 1 *г* окиси урана, для малых толщин больше, чем для больших. Даже при очень тонком слое порошкообразной окиси урана возможно, что большая часть испускаемой энергии (предполагая, что она создается по всему объему вещества) поглощается самим веществом. Приблизительное определение полной энергии, которая может быть излучена 1*г* урана в 1 *сек*, можно было бы найти, растворив несколько кристаллов, например нитрата урана, в воде и разлив раствор по поверхности большой площади. После испарения воды на этой поверхности осталась бы очень тонкая пленка нитрата.

В таком случае лучи, созданные во всем объеме пленки, достигли бы поверхности без большой потери на поглощение и ток насыщения в газе был бы пропорционален полной излучаемой энергии. В этом случае половина полной энергии поглотилась бы в веществе, на котором

помещена пленка, и лишь половина энергии принимала бы участие в создании ионов.

Чтобы получить приближенное значение полной энергии излучения, окись урана в виде очень тонкой пыли была рассыпана по поверхности 38 *см*².

Вес окиси урана 0,138 *г*; ток = 0,02 *эл.-стат.ед.*; полная энергия, излучаемая в газ за 1 *сек*, равна $1{,}4\cdot 10^{-10}$ *кал*; энергия 1 *г* окиси урана, излучаемая в воздух, равна 10^{-9} *кал/сек* = 0,032 *кал/год*.

При современном состоянии наших знаний неясно, ограничена ли излучающая способность поверхностью урана или она равномерно распределена во всей массе. В любом случае полная излучаемая энергия, вероятно, больше полученной выше величины вследствие поглощения излучения в самом уране, а также существования более проникающего типа излучения, энергией которого мы пренебрегли в приведенном выше расчете.

Энергия излучения тория

Применялся тот же прибор, что и для исследования урана. Использовалась окись тория и были получены следующие результаты (площадь поверхности 38 *см*²):

Вес окиси тория, *г*	0,339	0,665
Ток в 1 *сек*, *эл.-стат. ед.*	0,0445	0,0622

В предыдущих работах Оуэнс [12] и Резерфорд [17] тщательно изучили поведение окиси тория как радиоактивного вещества. Было показано, что соединения тория обладают некоторой материальной эмиссией, которая имеет временные радиоактивные свойства. Эта эманация наиболее проявляется при работе с толстыми слоями окиси тория. В настоящем случае слой был недостаточно толст, чтобы испустить много эманации, и скорость разряда была обусловлена исключительно излучением. Оуэнс показал, что излучение тория имеет приблизительно однородный состав.

Коэффициент поглощения излучения тория воздухом равен 0,69, $d = 4{,}1$, так что $1 - e^{-\lambda d} = 0{,}96$.

Следовательно, для веса 0.665 *г* полная энергия, излучаемая в газ единицей площади, равна $iW/0{,}96\varepsilon A$ *эрг*, а при тех же допущениях, что и для урана, энергия, излучаемая в воздухе, равна $1{,}2\cdot 10^{-11}$ *кал/сек*, т. е. несколько больше, чем для окиси урана такого же веса.

Возбужденная радиоактивность, обусловленная торием

Помимо способности испускать радиоактивную эманацию, соединения тория могут еще возбуждать временную радиоактивность во всех находящихся по соседству веществах. Это возбужденное излучение имеет однородный состав и представляет собой излучение более проникающего типа,

нежели излучение урана или тория. Интенсивность возбужденной радиоактивности может быть значительно усилена концентрацией ее на отрицательном электроде малой площади с помощью сильного электрического поля. Предположив, что энергия возбужденной на электроде радиации расходуется на образование ионов, можно оценить энергию. запасенную на электроде.

В одном из опытов тонкая платиновая проволока диаметром 0,018 *см* и длиной 1 *см* вызвала разделение примерно 10 *кулон* электричества, прежде чем потеряла радиоактивные свойства. Это соответствует выделению $2 \cdot 10^{-5}$ *кал.* Это отнюдь не незначительное количество энергии каким-то способом извлекается из поверхности платины площадью 0,056 *см*^{2} без малейшего изменения веса или внешнего вида проволоки.

Радий и полоний

Вопрос о равенстве скорости ионов, созданных излучением тория или лучами мощных радиоактивных веществ — радия и полония, и скорости ионов, созданных X-лучами, специально не исследовался, однако, учитывая очень близкое сходство типов этих излучений, кажется вполне вероятным, что ионы, созданные всеми излучениями, одни и те же.

Но в одном отношении некоторые радиоактивные вещества, особенно радий, отличаются по типу излучения от X-лучей. Беккерель, Кюри и другие исследователи в серии статей, напечатанных в «Comptes Rendus» показали, что радий испускает лучи, легко отклоняющиеся магнитом. Эта эмиссия лучей, подобных по характеру медленным катодным лучам, определяет весьма интересные явления, но, по-видимому, не обязательно присуща радиоактивным веществам. Например, Гизель нашел, что полоний испускает лучи, отклоняемые магнитом, тогда как Беккерель не смог обнаружить никакого магнитного воздействия на это же вещество. Кажется, что отклоняемые магнитом лучи присутствуют или отсутствуют в зависимости от способа приготовления вещества и, возможно, зависят от возраста образца. Один из авторов настоящей работы подверг испытанию два неочищенных образца радия и полония, полученных из уранита и не очень активных, но никакого магнитного действия не наблюдал. Беккерель не обнаружил никакого магнитного воздействия на излучение урана, а один из авторов этой статьи исследовал излучения и радия и тория в магнитном поле при атмосферном давлении и получил отрицательные результаты.

Опыты Кюри и Беккереля показали, что радий испускает два типа лучей, один из которых отклоняется магнитным полем, а другой не отклоняется. Те лучи, которые не отклоняются, похожи по характеру на вторичные *X*-лучи, а те, которые отклоняются, подобны медленным катодным лучам.

Таким образом, мы видим, что явления, характерные для радиоактивных веществ, не просты и что они различны для разных веществ. Однако,

можно все же дать приблизительную оценку излучения любого вида, если только вся энергия полностью поглощается при ионизации газа и создает ионы одного и того же вида. Кажется правдоподобным, что лучи радия, отклоняемые магнитным полем, подобны катодным лучам и что они, проходя через газ, его ионизуют. Результаты Макленнана [11] ясно показывают, что энергия катодных лучей при их прохождении через газ частично теряется на работу по ионизации газа. Если ионы, создаваемые отклоняемыми и неотклоняемыми лучами радиоактивных веществ, одинаковы и требуют для своего образования одинакового количества энергии, то относительные энергии испускаемых излучений можно сравнить по полному току насыщения, создаваемому лучами при их полном поглощении между электродами.

Если n — отношение токов между параллельными пластинами при равных площадях и толщинах испытуемого вещества и окиси урана (при условии, что пластины отнесены на достаточное расстояние, чтобы поглотить приблизительно все лучи), то энергия, излучаемая в газ испытуемым веществом, равна произведению n на энергию, излучаемую равной площадью окиси урана. Вероятно, это приблизительно справедливо и для проводимости, создаваемой отклоняемыми и неотклоняемыми лучами.

В некоторых опытах Кюри упоминает об использовании образцов радия в 100 000 раз более активных, нежели уран. Если это относится к измерениям для равных весов и площадей радия и урана, то полная энергия, излучаемая в атмосферу 1 *г* веса радия не менее 10^{-4} *кал/сек*, или 3200 *кал/год*.

Очевидно, что без притока энергии от внешнего источника вещество не может продолжать излучать энергию в таком количестве в течение многих лет, даже если предположить, что значительное количество энергии может быть получено за счет переустройства компонентов молекулы.

В свете результатов о количестве энергии, излучаемой радиоактивными веществами, интересно обсудить некоторые предположения относительно происхождения лучей и о подводе энергии, необходимой для непрерывного излучения.

Сначала мы сделаем краткий обзор наших современных знаний о радиоактивных веществах. Уран, первое из открытых радиоактивных веществ, был тщательно исследован. Беккерель показал, что уран, даже помещенный в темноту, испускает излучение постоянно, из года в год. Радиоактивность сохраняется в растворе и продолжает существовать, если вещество рекристаллизовано в темноте. Испускаемое излучение не зависит от окружающего газа и его давления и почти не подвержено влиянию значительных изменений температуры. Такое же излучение испускают все соединения урана. Кажется, что радиоактивность зависит только от молекулы урана, а не от того, с чем она соединена. Уранит и другие урановые минералы активны и, насколько нам известно из экспериментов, они продолжают излучать неограниченно долго.

При рассмотрении проблемы излучения энергии единицей веса урана возникает второй вопрос, который трудно решить удовлетворительно опытным путем,— ограничивается ли радиоактивность поверхностью или захватывает всю массу вещества. На первый взгляд радиоактивность кажется поверхностным явлением, так как интенсивность излучения не возрастает с увеличением толщины урана. Однако этого можно ожидать даже и при объемной радиации, поскольку излучение может проникать к поверхности с очень малой глубины. Рост интенсивности излучения с увеличением толщины для тонких слоев и поведение растворов подтверждают предположение, что активность есть объемное свойство. Наиболее вероятно, что энергия, излучаемая во внутренние области вещества, рассеивается в виде тепла. Если радиоактивная способность характерна для всего объема, то из указанного выше предположения следует, что минерал уранит должен был бы излучать энергию с момента своего образования как минерала. Если мы предположим, что излучение продолжалось с ее современной скоростью в течение 10 млн. лет, то каждый грамм урана излучил по крайней мере 300 000 *кал.*

Трудно предположить, что такое количество энергии может быть извлечено из перегруппировки атомов или из молекулярных рекомбинаций, следующих обычной химической теории. Эта трудность еще больше увеличивается, если мы рассмотрим излучение энергии из радия, вещества в 100 000 раз более активного, чем уран. Эмиссия энергии в этом случае составляет по крайней мере 3000 *кал/год*. Если будущие опыты покажут, что радий, так же как уран, испускает излучение с постоянной скоростью из года в год, то, чтобы объяснить такую быструю эмиссию энергии, необходимо предположить, что радиоактивное вещество действует в какой-то степени как преобразователь энергии. Такое предположение кажется невероятным и приводит нас ко многим затруднениям.

Однако по идее, развитой недавно Дж. Дж. Томсоном, атом не простая сущность, а состоит из большого числа положительно и отрицательно заряженных электронов; возможно, энергия, которая может быть получена от более тесного сближения или перегруппировки компонентов молекулы, гораздо больше, чем это следует из атомной теории, как ее обычно понимали. Энергия, необходимая, чтобы разложить молекулу на составляющие ее электроны, возможно, во много тысяч раз больше энергии, необходимой для разложения молекулы на атомы. В случае урана, той энергии, которая может быть получена от большей концентрации или сближения компонентов такой сложной молекулы, по-видимому, вполне достаточно, чтобы поддерживать излучение в течение долгого времени. Внезапные движения электронов приводили бы их заряды в колебательное движение и вызывали бы ряд электромагнитных импульсов, соответствующих X-лучам. Замечательное свойство некоторых радиоактивных веществ, состоящее в естественном испускании чего-то вроде катодных лучей, показывает, что современные взгляды на поведение молекул требуют изменения или расширения, чтобы объяснить такие явления. Энергии,

которая может быть получена от перегруппировки деталей атома, не будет достаточно, чтобы поддерживать в течение многих лет постоянную эмиссию энергии сильным радиоактивным веществом, подобным радио. Важно, чтобы опыты по проверке постоянства излучения мощного радиоактивного вещества, подобного радию, проводились бы через определенные промежутки времени. Если бы излучение поддерживалось постоянным из года в год, то это было бы строгим доказательством того, что энергия излучения питается не за счет затрат химической энергии радиоактивного вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dorn.* Wied. Annal., **63**, 150.
2. *Moffat A.* Proc. Roy. Soc. Edinburgh, 1898.
3. *Tumlirz.* Wied. Annal., 38, 640.
4. *Tronton.* Brit. A soc. Rept., 1896.
5. *Wiedemann E.* Wied. Annal., **37**, 233.
6. *Sumpner E.* Phil. Mag., February, 1893.
7. *Thomson J. J.* Phil. Mag., December, 1898.
8. *Rutherford E.* Phil. Mag., April, 1897.
9. *Rutherford E.* Phil. Mag., January, 1899.
10. *Thomson J. J.* Proc. Cambridge Philos. Soc., 1898, **10**, pt. 1.
11. *McLennan.* Roy. Soc. Proc., 1900, **66**; Phil. Trans. A, **195**.
12. *Owens R. B.* Phil. Mag., October, 1899.
13. *Townsend J. S* Phil. Trans. A, 1899.
14. *Chattock* Phil. Mag., October, 1899.
15. *Thomson J. J.* Recent Researches.— Phil. Mag., 1891, 89.
16. *Peace.* Phil. Trans. A, 1900.
17. *Rutherford E.* Phil. Mag., January & February, 1900.

НОВЫЙ ГАЗ ИЗ РАДИЯ *

(Совместно с Г. Т. Брукс)

В одном из последних номеров «Comptes Rendus» напечатано сообщение Кюри об открытии нового газа, который выделяется из радия и обладает замечательными физическими свойствами. Образец радия очень большой радиоактивности был помещен в стеклянный сосуд, соединенный со ртутным насосом. После того как система была откачана и насос был отключен, давление в сосуде стало постепенно увеличиваться. Когда очень маленький объем газа, собранного таким образом, пропускался через стеклянные трубки, они фосфоресцировали, и если газ оставался в них некоторое время, то быстро чернели. Газ сам по себе был сильно радиоактивным, т. е. непрерывно испускал лучи типа лучей Рентгена, которые вызывали частичную электропроводность газов и быстро воздействовали на фотопластинку. Газ сохранял радиоактивность в течение нескольких недель.

Некоторое время тому назад один из авторов данной статьи независимо исследовал одно из самых замечательных свойств радиоактивных веществ — их способность непрерывно испускать радиоактивные частицы определенного сорта. Образующееся таким способом вещество мы назвали «эманацией», поскольку в то время было неясно, является ли испускаемое вещество паром, радиоактивным газом или же частицами вещества, каждая из которых содержит большое число молекул.

Было показано, что эманация соединений тория сохраняет радиоактивность в течение нескольких минут и обладает удивительной способностью вызывать радиоактивность каждого вещества, расположенного по соседству с торием, причем эта радиоактивность сохраняется в течение нескольких дней. Образец не совсем чистого радия, которым располагал автор, не испускал такой эманации, однако Дорн позднее использовал более активный образец радия и показал, что радий обладает такой же способностью испускать эманацию, как и торий. Одно из наиболее интересных свойств возбужденной радиоактивности — ее способность концентрироваться в электрическом поле на катоде, так что очень тонкую проволочку из любого металла можно сделать на несколько дней сильно радиоактивной.

---

* Transactions of the Royal Society of Canada, 1901, section III, ser. II, 7, 21—25.

Недавно один из авторов настоящей статьи опубликовал в «Physikalische Zeitschrift» сообщение о влиянии температуры на способность радиоактивных материалов испускать эманацию. В этой статье было показано, что при увеличении температуры почти до красного каления способность тория испускать эманацию возрастает, а при нагреве до белого каления эта способность разрушается и уже восстановлена быть не может. Исследование образца радия, полученного от де Хаена из Ганновера, показало, что температура влияет очень сильно на способность радия испускать эманацию. Когда вещество нагревалось до красного каления, его способность испускать эманацию возрастала более чем в 10 000 раз, однако при еще большей температуре эта способность почти совершенно исчезала. Было обнаружено, что эманация, полученная при продувании медленного потока воздуха над нагретым радием, сохраняла радиоактивные свойства в течение нескольких недель, если она находилась в закрытом металлическом сосуде.

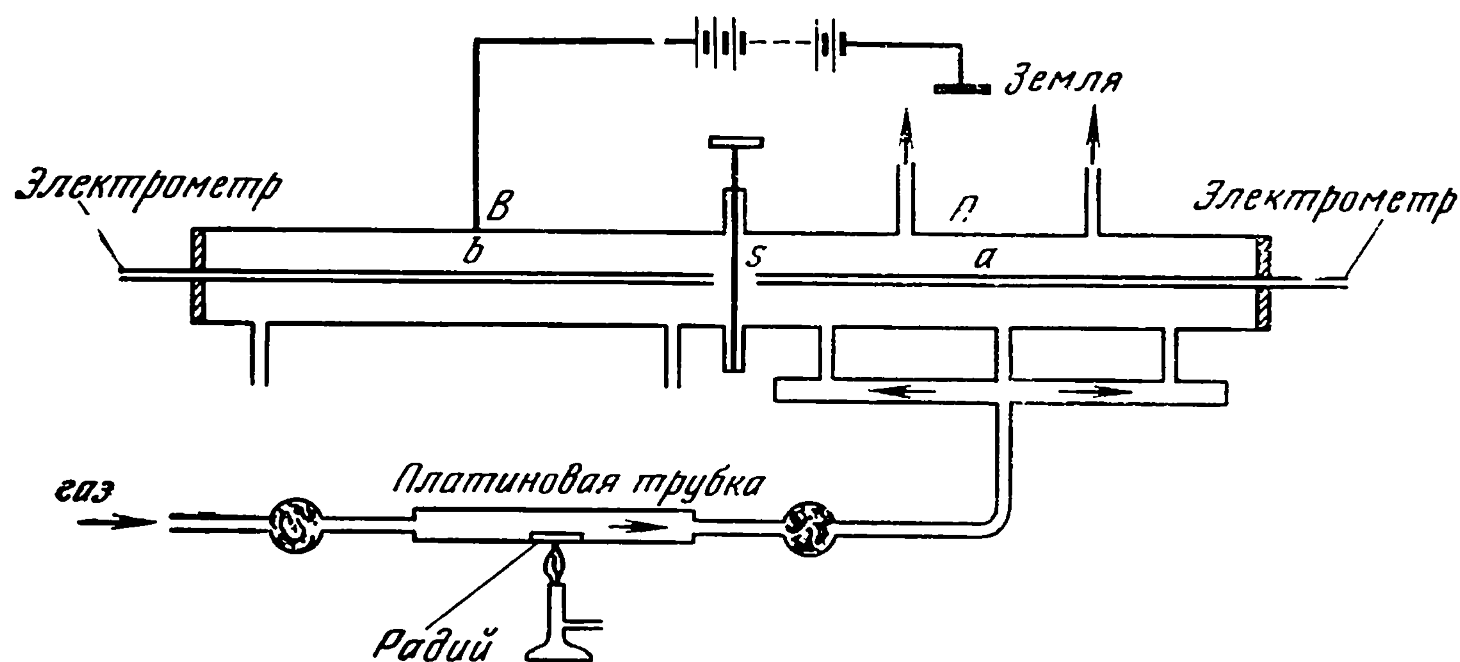
Хотя эта радиоактивность медленно распадалась, однако ее еще можно было заметить даже через месяц.

Теперь возникает вопрос, какие можно предложить физические опыты, чтобы установить, чем в действительности является эманация — радиоактивным газом, выходящим из вещества, веществом в парообразном состоянии или же частицами, размеры которых больше молекулы. Опыты с торием показали, что если окись тория поместить в вакуумную трубку, соединенную со ртутным насосом, то заметного объема газа собрать нельзя. В спектре этого газа не наблюдается никаких новых линий. Количество эманации, полученное таким способом, слишком невелико, чтобы ее можно было непосредственно обнаружить, однако вызванная ею электрическая проводимость газов часто имеет очень большую величину, и это можно использовать для измерения количества эманации. Эманация испускает некое излучение, которое ионизует окружающий газ. Если приложить сильное электрическое поле, то ток через газ достигает максимального значения, которое равно полному числу ионов, образующихся за 1 *сек*, умноженному на заряд иона.

Если определить скорость диффузии эманации в воздухе или других газах, использовав электрический метод, то можно получить приближенную оценку для молекулярного веса эманации. Коэффициент взаимной диффузии газов известен уже давно, и результаты опытов показывают, что коэффициент диффузии одного газа в другой обратно пропорционален квадратному корню из произведения молекулярных весов газов. Таким образом, если обнаружится, что коэффициент диффузии эманации в воздухе лежит между коэффициентами диффузии двух каких-то газов A и B, то мы можем заключить, что молекулярный вес эманации лежит между молекулярными весами газов A и B.

Прибор, использовавшийся для этих измерений, был подобен тому, который применял в 1871 г. Лошмидт [1] в опытах по определению коэффициента взаимной диффузии газов.

На рисунке показан общий вид прибора. Длинный латунный цилиндр *AB* диаметром 6 *см* и длиной 73 *см* разделен на две равные части съемной металлической диафрагмой *S*. Концы цилиндра закрыты эбонитовыми пробками. Через эти эбонитовые пробки проходят два изолированных латунных прута *a* и *b*, каждый длиной в половину трубы; внутри трубы они центрированы. Цилиндр изолирован и присоединен к одному полюсу батареи напряжением 300 *в*, другой полюс которой заземлен. Центральные пруты можно подсоединить к чувствительному квадрантному электрометру.



Цилиндр был покрыт толстым слоем войлока и помещен в металлическую коробку, заполненную хлопковой ватой, для того, чтобы по возможности поддерживать постоянную температуру.

Чтобы в полуцилиндр *A* внести достаточное количество эманации, необходимо слегка нагреть радий. При этом нужно вставить диафрагму *S* и открыть боковые трубки. Через платиновую трубочку, в которой находилось небольшое количество соединения радия, продувался медленный поток сухого воздуха из газового резервуара. Эманация вместе с воздухом выносилась в цилиндр *A*. Когда было введено достаточное ее количество, что контролировалось по электрометру, поток воздуха перекрывался. Боковые трубки закрывались тонкими капиллярами. Это гарантировало от значительных диффузионных потерь газа, при этом давление газа внутри поддерживалось равным давлению внешней среды. Три входящие в цилиндр трубки, показанные на рисунке, служили для того, чтобы предварительно смешивать, насколько можно однородно, газ и эманацию.

Через несколько часов, пока устанавливались стабильные температурные условия, диафрагма открывалась и эманация начинала диффундировать в трубку B.

Ток через трубки *A* и *B* измерялся через равные интервалы времени с помощью электрометра, к которому была подсоединена соответствующая емкость. Сначала ток через трубку *B* не идет, но после того, как откры-

вается диафрагма, ток через трубку A уменьшается, а через трубку B постепенно возрастает. Через несколько часов токи в каждой половине становились приблизительно одинаковыми; это указывало на то, что эманация почти однородно продиффундировала через цилиндр.

Можно легко показать [2], что

$$\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \frac{8}{\pi^2}\left\{e^{-\frac{\pi^2 Kt}{a^2}} + \frac{1}{9}e^{-\frac{9\pi^2 Kt}{a^2}} + \text{и т. д.}\right\},$$

где K — коэффициент диффузии эманации в воздухе; t — продолжительность опыта по диффузии (в *сек*); a — общая длина цилиндра; S_1 — количество эманации в трубке A в конце опыта; S_2 — количество эманации в трубке B в конце опыта (см. [2]).

Если известны S_1 и S_2, то из этого уравнения можно найти значение K.

Однако при измерении S_1 и S_2 возникает неопределенность, поскольку скорость разряда в трубках A и B определяется как током, вызванным собственно эманацией, так и током за счет возбужденной радиоактивности на электродах. Поскольку величина возбужденной радиоактивности возрастает со временем, то отношение тока вследствие эманации к току за счет возбужденной радиоактивности изменяется за время диффузии. Относительную величину тока, вызванного возбужденной радиоактивностью, можно определить, удалив центральный электрод и измерив ток сразу после введения нового электрода.

Если эманация диффундировала полчаса, то ток, вызванный возбужденной радиоактивностью, составлял примерно 0,4 от полного тока.

Вычисленное значение K после введения поправки на ток, вызванный возбужденной радиоактивностью, увеличивалось приблизительно на 20%.

Из этих опытов было найдено, что величина K лежит между 0,08 и 0,15. Все позднейшие измерения дали значение K около 0,08.

Наблюдаемый в этих опытах разброс значений K обусловлен не только ошибками эксперимента. Значения K, полученные с новым препаратом радия, были всегда больше, чем значения, полученные с образцом, пролежавшим несколько месяцев. Это указывает как будто на то, что эманация имеет сложный состав и что та ее часть, которая испускается вначале, имеет меньший молекулярный вес, нежели часть, которая испускается после нескольких месяцев пребывания образца на воздухе. Сейчас проводятся дальнейшие опыты с целью выяснить, изменятся ли постепенно свойства эманации радия со временем. Для сравнения мы приводим в таблице несколько коэффициентов взаимной диффузии газов, заимствованных из таблиц Ландольта и Бернштейна.

Из этой таблицы мы видим, что при увеличении молекулярного веса коэффициент взаимной диффузии падает. Как показано экспериментально, в случае простых газов коэффициент взаимной диффузии приблизительно обратно пропорционален квадратному корню из произведения молекулярных весов. Если эти рассуждения применить к эманациям

Газ или пар	Коэффициент диффузии в воздухе	Молекулярный вес
Водяной пар	0,198	18
Углекислый газ	0,142	44
Спирт	0,101	46
Эфир	0,077	74

(K = от 0,08 до 0,15), то можно сказать, что эманация — это газ или пар с молекулярным весом, лежащим, вероятно, между 40 и 100 (мы допускаем широкий разброс). Полученные величины исключают возможность того, что это вещество — пар радия, поскольку, как показали супруги Кюри, атомный вес радия больше, чем бария. Отсюда мы должны заключить, что эманация в действительности представляет собой тяжелый радиоактивный пар или газ.

Вследствие быстрого исчезновения радиационной способности эманации тория невозможно определить таким способом коэффициенты ее диффузии. Однако специальные опыты показали, что она диффундирует быстро и, повидимому, газообразна. Физические свойства этих эманаций или газов чрезвычайно удивительны. Эманация радия не только непрерывно продолжает в течение длительного времени оставаться источником излучения, которое, очевидно, по своему характеру подобно легко поглощаемым лучам Рентгена, но, кроме того, еще каким-то образом выделяет из себя положительно заряженную материю, которая притягивается к отрицательно заряженным электродам и становится источником вторичной радиоактивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Loschmidt.* Wiener Akad., 1871.
2. *Stefan*, *Loschmidt.* Ber. Wiener Akad., 1871, 63.

1902

8

ОТКЛОНЯЕМЫЕ ЛУЧИ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ *

(Совместно с А. Г. Гриром)

§ 1

Эксперименты Гизеля, Беккереля, Кюри, Мейера и Швейдлера [1] показали, что радий испускает какие-то лучи, отклоняемые магнитом.

Кроме того, Беккерель показал, что уран и возбужденная радием радиоактивность также испускают лучи, отклоняемые магнитным полем. Для обнаружения отклоняемых лучей Беккерель использовал фотографический метод, а супруги Кюри, Мейер и Швейдлер использовали электрический метод для анализа отклоняемых лучей, испускаемых радием.

Дальнейшие опыты показали, что отклоняемые лучи во всех отношениях подобны катодным лучам. Дорн [2] показал, что эти лучи отклоняются в электростатическом поле, тогда как супруги Кюри [3] установили, что они несут отрицательный заряд. Беккерель определил скорость этих «электронов», наблюдая магнитное и электростатическое отклонение лучей. Он обнаружил, что лучи, испускаемые радием имеют сложный характер и обладают самыми разными скоростями. Некоторые из них движутся со скоростью, превышающей половину скорости света. Было найдено, что отношение заряда к массе e/m почти то же, что и у катодных лучей. Эти результаты недавно были подтверждены Кауфманом [4], который показал, что некоторые из этих электронов движутся со скоростью, почти равной скорости света, а отношение e/m несколько меньше, чем для сравнительно медленных катодных лучей и, по-видимому, уменьшается с возрастанием скорости электрона. Это приводит к заключению, что часть эффективной массы этих быстрых электронов носит электрический характер [5].

Авторы нашли, что не только уран и радий, но и ториевые соединения, а также радиоактивность, возбужденная торием, испускают какие-то лучи, отклоняемые магнитным полем.

Главный предмет исследований, описываемых в этой статье, — получение некоторых экспериментальных доказательств связи, если таковая существует, между отклоняемыми и неотклоняемыми лучами, испускаемыми радиоактивными веществами,— ураном, торием и радием. Известно, что катодные лучи, ударяясь о твердое тело, рождают лучи Рентгена,

---

* Philosophical Magazine, September. 1902, ser. 6, 4, 315—330, Доложено Американскому физическому обществу 21 апреля 1902 г.

которые, падая на тела, в свою очередь дают вторичное излучение, состоящее частью из лучей, похожих на катодные лучи.

Таким образом, как предположил Беккерель, неотклоняемые лучи, возможно, вызываются непосредственно действием отклоняемых лучей. Подобное же предположение было выдвинуто одним из авторов этой работы [6] с целью объяснить присутствие двух типов лучей, испускаемых ураном; причем один из них гораздо более проникающий, чем другой. Положение, однако, гораздо более сложное, чем можно было бы предположить по такой простой аналогии. Обсуждение этих вопросов, а также специальное указание на важные результаты, полученные по частичному разделению активных продуктов урана и тория, даны в заключительной части этой статьи.

§ 2

Во всех этих опытах применялся электрический метод. Этот метод имеет много преимуществ по сравнению с фотографическим методом, особенно, когда требуются количественные сравнения и быстрота измерений.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Исследуемое радиоактивное вещество равномерно распределялось по дну мелкой бумажной коробки, установленной в свинцовом ящике размером 3 *см* × 3 *см* и глубиной 2 *см*. Бумажная коробка лежала на проволочной сетке на расстоянии 1 *см* от дна камеры и с помощью водоструйного насоса через аппарат прогонялся сверху вниз непрерывный поток воздуха. Он уносил насыщенную торием и радием радиоактивную эманацию, наличие которой в установке могло бы сильно помешать измерениям. Свинцовый ящик был установлен между полюсными наконечниками (размером 3,2 *см* × 3,2 *см*) большого электромагнита, удаленными один от другого на 3,2 *см*.

Измерительная камера представляла собой прямоугольный цинковый сосуд размером 10,5 *см* × 10,5 *см* и высотой 30 *см*. Его внешняя поверхность была подсоединена к одному полюсу батареи напряжением 100 *в*. Внутренним электродом служил латунный стержень, соединенный с электрометром. Защитное кольцо, соединенное с землей, гарантировало от естественной утечки с заряженного цилиндра на внутренний электрод.

Измерительная камера помещалась на изолированной металлической пластине с отверстием в центре размером 3,2 *см* × 3,2 *см* над зазором электромагнита. Оно было прикрыто одним слоем алюминиевой фольги толщиной 0,00034 *см*.

Чтобы оградить электрометр и соединения от электростатических воздействий всех видов, были приняты особые меры предосторожности.

В таком приборе легко обнаружить магнитное отклонение лучей радия с помощью обыкновенного электрометра, ибо ионизационное действие лучей радия очень велико. Однако ионизация тория и урана, вызванная отклоняемыми лучами, очень мала, и для точного измерения требуется особо чувствительный электрометр. Достаточно чувствителен для этой цели электрометр Долежалека, описанный одним из авторов работы [7].

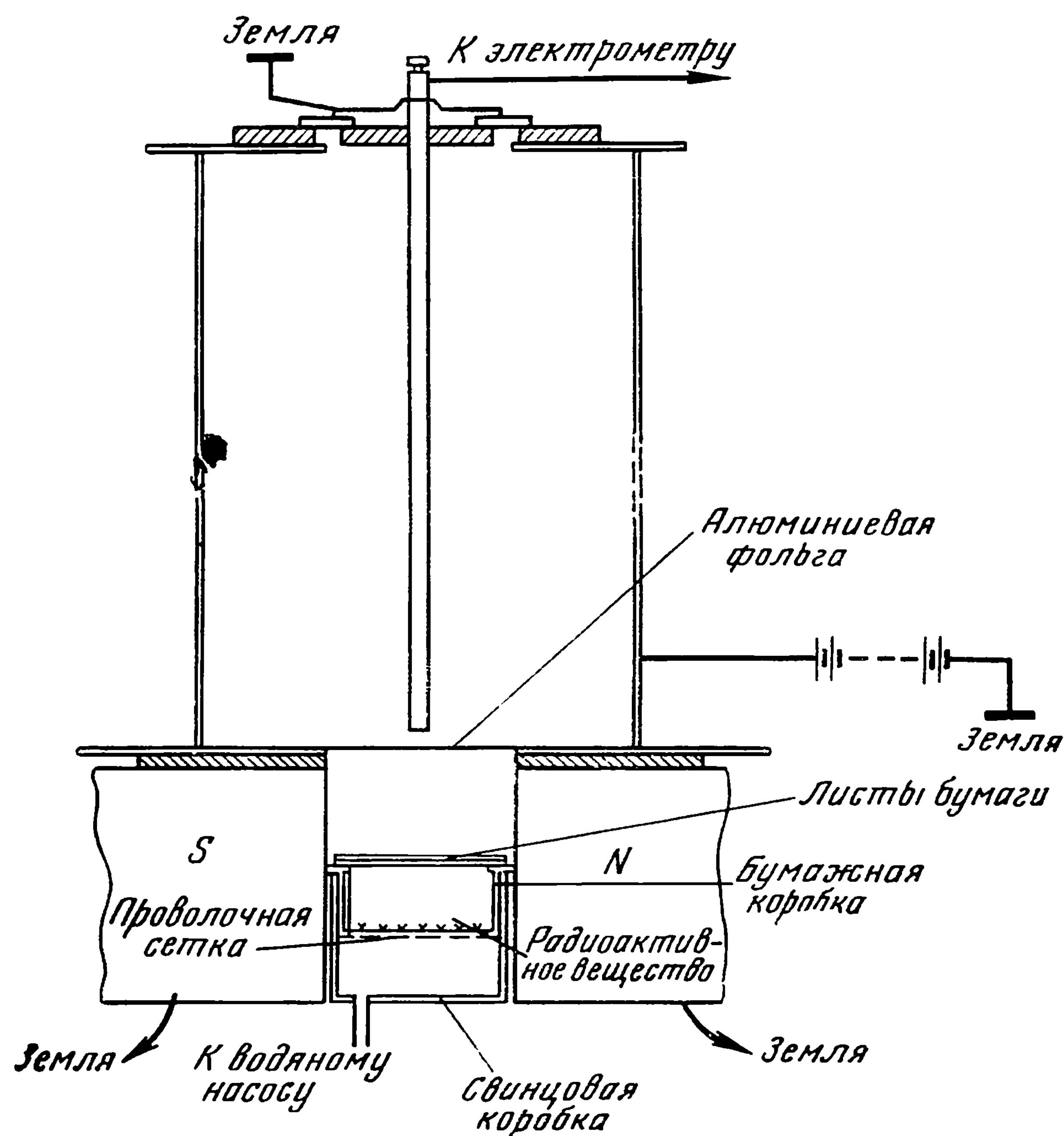


Рис. 1

Все радиоактивные вещества испускают как отклоняемые, так и неотклоняемые лучи, и обычно ионизующее действие неотклоняемых лучей много больше, чем отклоняемых. С открытыми радиоактивными веществами ионизация в измерительной камере обусловлена главным образом неотклоняемыми лучами. Поэтому даже сильное магнитное поле незначительно изменяет ионизационный ток, наблюдаемый в электрометре. Однако неотклоняемые лучи могут быть полностью поглощены двумя или больше слоями бумаги, тогда как отклоняемые лучи пройдут сквозь них и очень слабо поглотятся.

Отклоняемые лучи состоят из быстро движущихся электронов и ионизуют воздух, проходя через него и сталкиваясь с молекулами. Обычно отклоняемые лучи столь проникающи, что способны, вероятно, пройти сквозь слой воздуха более 1 *м*, прежде чем их ионизационное действие снизится наполовину.

Если приложить сильное магнитное поле, то траектории лучей искривятся, так что лишь их малая часть входит в измерительную камеру.

Как правило, в опытах применялось магнитное поле в 2200 *эл.-стат. ед.* Обычно оно снижало ионизационный ток в измерительной камере до

20% его первоначальной величины. При увеличении напряженности поля ток монотонно уменьшался, показывая, что исследуемый эффект обусловлен преимущественно отклоняемыми лучами. Малый процент ионизации в измерительной камере в случае радия был обусловлен какими-то исключительно проникающими неотклоняемыми лучами. Эти лучи были исследованы Виллардом и Беккерелем фотографическим методом. Разность токов в измерительной камере с включенным и выключенным магнитом принималась за меру количества отклоняемых лучей.

§ 3. Зависимость количества отклоняемых лучей от толщины радиоактивного слоя

На площади около 9 *см*^{2} распределялись разные количества радиоактивного вещества, которое должно было быть исследовано. Поверх него были уложены 4 слоя бумаги, полностью поглощавшие α-излучение.

В табл. 1 приведены результаты с радием и ураном. Количество отклоняемых лучей выражено в делениях шкалы электрометра в секунду и представляет собой разность ионизационных токов в измерительной камере при включенном и выключенном магните.

Таблица 1

Окись урана		Хлористый радий	
Вес, *г*	Деления в 1 *сек*	Вес, *г*	Деления в 1 *сек*
0,25	0,47	0,25	1,5
0,50	0,90	0,5	2,9
1	1,26	1	5,5
2	1,70	1,55	6,7
5	1,96		

Когда исследовался радий, параллельно электрометру была включена емкость 0,005 *мкф*.

Результаты, полученные при исследовании урана, подтверждают предположение, что каждая порция вещества излучает электроны пропорционально своей массе. Число испускаемых электронов сначала пропорционально толщине, а затем стремится к насыщению, так как электроны из нижних слоев поглощаются, не достигнув поверхности.

Результаты, полученные при исследовании радия, носят такой же характер, однако у нас не было достаточного количества вещества, чтобы исследовать влияние более толстых слоев. От этого образца радия (полученного от де Хаена из Ганновера) отклоняемые лучи были в 250 раз интенсивнее лучей от равного веса окиси урана.

§ 4. Отклоняемые лучи из соединений тория

Окись тория излучает отклоняемые лучи значительно слабее, чем равный вес окиси урана, хотя неотклоняемые лучи имеют приблизительно одинаковую интенсивность. По этой причине отклоняемые лучи в тории гораздо труднее обнаружить и измерить, чем в уране. При измерениях на соединениях тория должны быть приняты все меры предосторожности, чтобы присутствие радиоактивной эманации и возбужденной ею радиоактивности не искажало результатов измерений отклоняемых лучей.

Около 5 *г* соединения тория были равномерно распределены в прямоугольной свинцовой камере длиной 3 *см*, шириной 2 *см* и глубиной 1 *см*. Сверху воском прикреплялась очень тонкая пластинка слюды. Слюда пропускала бóльшую часть отклоняемых лучей, поглощала бóльшую часть неотклоняемых и была непроницаема для эманации. Наблюдения проводились сразу же, как только торий был помещен в камеру, и измерялась разность токов с включенным и выключенным магнитными полями. Легкий поток воздуха подавался через боковую трубу в свинцовую камеру и проходил над торием, унося эманацию. Установлено, что количество отклоняемых лучей неизменно; следовательно, отклоняемые лучи от эманации (если они и были) не влияли ощутимо на результат. Если боковая труба свинцовой камеры была закрыта и торий оставался в покое в течение 24 *час*, количество отклоняемых лучей значительно возрастало. Как оказалось, это возрастание было обусловлено отклоняемыми лучами, испускаемыми возбужденной радиоактивностью, созданной эманацией на внутренних стенках камеры. Это было проверено непосредственно путем удаления слюдяной пластинки и установкой камеры между полюсами электромагнита. Оказалось, что испускаются как отклоняемые, так и неотклоняемые лучи, обусловленные возбужденной радиоактивностью, созданной в камере.

Выяснилось, что количество отклоняемых лучей, испускаемых равными весами разных соединений тория, значительно меняется от вещества к веществу (табл. 2).

В приведенной таблице количество отклоняемых лучей из обычной окиси тория принято за единицу, а количество отклоняемых лучей из

Таблица 2

Соединение	Количество отклоняемых лучей	Соединение	Количество отклоняемых лучей
Окись тория	1	Сульфат	0,83
Окись без эманации	1,35	Оксалат	0,76
Нитрат	0,94	Окись урана	6,7

других веществ выражено через него. Для сравнения указано количество отклоняемых лучей от такого же веса черной окиси урана.

Отношения, приведенные в последней таблице, были найдены не непосредственной оценкой влияния магнитного поля, а косвенным методом, описанным в § 9 и основанным на том факте, что проникающие лучи от тория, как и от урана, в основном отклоняемые.

В свинцовой камере площадью 22 *см*^{2} были равномерно рассыпаны 4 *г* порошкообразного соединения тория. Сверху была приклеена алюминиевая фольга толщиной 0,006 *см*. Она поглощала все неотклоняемые лучи и пропускала бо́льшую часть отклоняемых. Ионизационный ток, обусловленный этими проникающими лучами, обнаруживался обычным способом и принимался за меру их интенсивности.

Деэманированная окись, т. е. окись, которая путем нагревания до белого каления была в значительной мере лишена своей способности испускать радиоактивную эманацию, дает больше отклоняемых лучей, чем обыкновенная окись, тогда как нитрат почти так же активен, как и обычная окись, хотя содержание тория в ней почти в 2 раза меньше.

Оказалось, что увеличение числа отклоняемых лучей со временем, когда торий хранится в закрытом сосуде в течение 24 *час*, весьма значительно меняется для разных соединений. Для обычной окиси характерно гораздо большее возрастание, чем для деэманированного образца, а углекислый торий, испускающий в пять раз больше эманации, чем окись, дает еще большую разницу. Это увеличение со временем отклоняемых лучей в закрытом сосуде прямо пропорционально способности соединения испускать эманацию и обусловлено отклоняемыми лучами, созданными возбужденной радиоактивностью на стенках сосуда.

Эти результаты приводят к заключению, что по меньшей мере часть отклоняемых лучей обусловлена наличием возбужденной радиоактивности во всей массе самого соединения. Если эманация, образуемая, очевидно, всеми соединениями тория, не может быстро улетучиться в воздух, она вызывает возбужденную радиоактивность в массе соединения. Следовательно, деэманированная окись производит больше возбужденной радиоактивности, чем обыкновенная, из которой больше эманации улетучивается в воздух. Поскольку возбужденная радиоактивность дает начало отклоняемым лучам, эффект будет большим от деэманированной окиси, чем от обычной.

§ 5. Отклоняемые лучи, испускаемые возбужденной радиоактивностью тория и радия

Магнитное поле отклоняет лишь небольшую часть лучей, испускаемых возбужденной радиоактивностью тория и радия. Поскольку эти возбужденные излучения со временем затухают, важно было узнать, уменьшается ли количество лучей в той же степени.

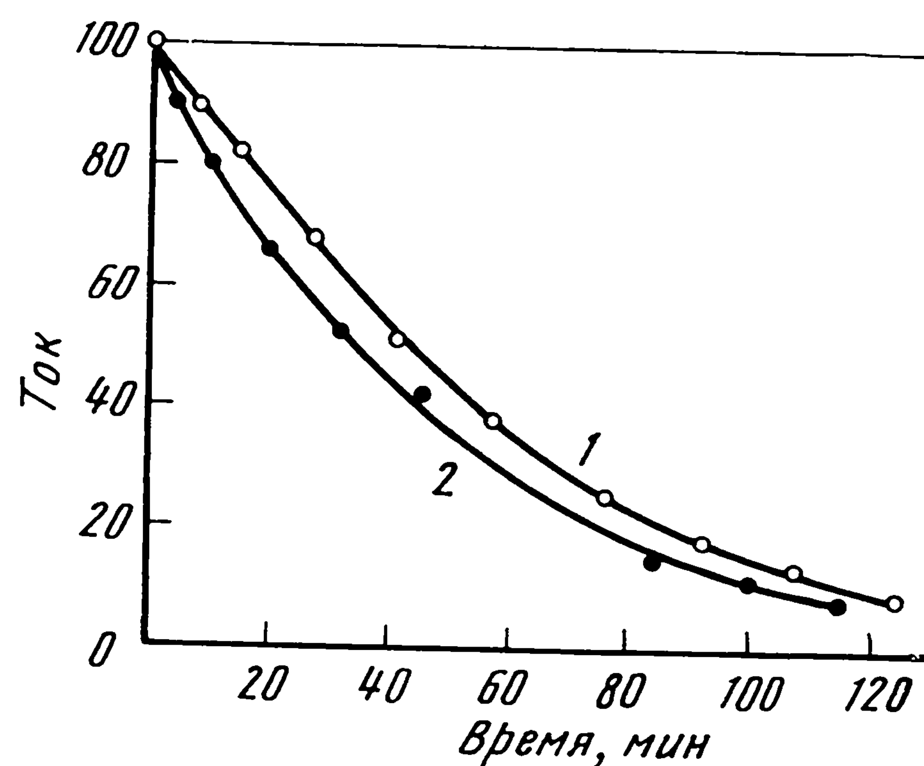


Рис. 2

Катодом служила свинцовая проволока, которую помещали в цилиндрический закрытый сосуд, содержащий эманацию радия, полученную пробулькиванием воздуха через раствор хлористого радия. Проволоку на один день оставляли в сосуде, чтобы возбужденная радиация достигла постоянного значения. Потом проволока была свита в небольшую спираль и помещена между полюсами электромагнита, изображенного на рис. 1.

Через равные промежутки времени измерялись токи, соответствующие как отклоняемым, так и неотклоняемым лучам. На рис. 2 эти результаты представлены в вида графика. Кривая *1* соответствует уменьшению со временем интенсивности неотклоняемых лучей, кривая *2* — отклоняемых лучей. Для лучшего сравнения наибольшая величина каждого тока принята равной 100.

Аналогичный опыт был проведен с возбужденной радиоактивностью от тория.

Таблица 3

Время, *час*	Неотклоняемые лучи	Отклоняемые лучи
0	1	1
3	0,77	0,83
19	0,38	0,33
42	0,08	0,07

Катод в виде алюминиевой пластины размером 3 *см* × 2 *см* был помещен в закрытый сосуд, содержащий около 200 *г* тория, и оставлен там на два дня. В табл. 3 приведены данные уменьшения интенсивности обоих типов лучей. Для сравнения первоначальное значение каждого принято за единицу.

Результаты исследования излучения, возбужденного торием и радием, говорят о том, что уменьшение интенсивности отклоняемых и неотклоняемых лучей одинаково. Отсюда следует, что между возникновением этих двух типов излучения существует очень тесная связь.

§ 6. Активные продукты, выделенные из тория и урана

В предыдущей работе [8, 9] было показано, что воздействием на азотнокислый торий гидроокисью аммония от тория при осаждении осадка можно отделить очень активный продукт. Если фильтрат, свободный от тория, выпарить до сухого состояния и удалить прокаливанием соли аммония, получается очень малый чрезвычайно активный остаток, обладающий в некоторых случаях в 1000 раз большей активностью, чем торий. Эта радиоактивная фракция была названа торием X. В то же время радиоактивность осажденного тория уменьшается в большинстве случаев до 0,36 от ее первоначального значения.

Исследование радиоактивности тория продолжено Резерфордом и Содди и одновременно были поставлены параллельные опыты по частичному отделению активных продуктов от урана по методу Крукса и Беккереля. Результаты этих исследований вскоре будут опубликованы, но авторы данного сообщения обязаны Ф. Содди, сотруднику Химического факультета, любезно проведшему химическую подготовку тория и урана, которые были исследованы в этой работе.

Обнаружено, что ThX излучает не только отклоняемые, но и неотклоняемые лучи, а также радиоактивную эманацию. Отклоняемое излучение носит сложный характер, как и в случае обыкновенного тория, и содержит большую долю легко поглощаемых отклоняемых лучей. Большое число последовательных осаждений позволяет получить торий, почти полностью свободный от отклоняемых лучей, хотя около 30% неотклоняемых лучей все еще остается.

Итак, мы видим, что неотклоняемые лучи продолжают существовать в тории даже тогда, когда продукт, создающий отклоняемые лучи, полностью удален.

Весьма похожее поведение обнаружил активный продукт, отделенный от урана по методу Крукса и Беккереля. Крукс [10] получил двумя методами весьма активный осадок из урана. В первом случае было найдено, что при добавлении эфира к нитрату урана часть нитрата растворилась в эфире. Нерастворимая в эфире часть была значительно более радиоактивна, нежели растворимая. В другом случае нитрат был растворен в воде и к нему был добавлен углекислый аммоний. Небольшой осажденный остаток оказался значительно активнее равного веса урана. Эту активную фракцию Крукс назвал UX.

Беккерель обнаружил [11], что в результате непрерывного осаждения сульфата бария в смеси урана с хлористым барием уран полностью потерял свою способность фотографического действия, тогда как сульфат

бария унес с собой очень активную фракцию. Со временем первоначальная радиоактивность урана полностью восстановилась, а сульфат бария стал неактивным.

Исследование выделенного Круксом UX и активного сульфата бария Беккереля показало, что их излучение почти полностью состоит из отклоняемых лучей. Проводимость, обусловленная отклоняемыми лучами, составляла более $^2/_3$ от полной проводимости, тогда как проводимость, обусловленная отклоняемыми лучами тонкой пластинки урана, составляет не более 1% от полной (см. § 7).

В уране, из которого тремя способами была удалена активная фракция, почти полностью отсутствовали отклоняемые лучи, тогда как количество неотклоняемых лучей почти не изменилось. Никакого следа отклоняемых лучей после 12 осаждений с сульфатом бария у урана не было обнаружено, хотя легко могли быть обнаружены 0,5% первоначального их количества. Итак, мы видим, что фракция, ответственная за отклоняемое излучение, испускаемое ураном и торием, может быть отделена разными химическими способами, тогда как хотя бы часть неотклоняемого излучения остается.

§ 7. Другие результаты

Никаких следов отклоняемых лучей, испускаемых полонием, электрическим методом нельзя было обнаружить. То же показали результаты, полученные Беккерелем фотографическим методом. До сих пор нам не удалось получить также убедительного доказательства существования отклоняемых лучей, испускаемых эманацией тория, хотя сильные неотклоняемые лучи она испускает.

§ 8. Проникающая способность отклоняемых лучей

Проникающую способность отклоняемых лучей можно определить по уменьшению магнитного влияния в измерительном цилиндре, для чего радиоактивное вещество следует покрыть несколькими слоями тонкого алюминия или станиоля.

Если магнитное влияние уменьшается с толщиной в геометрической прогрессии, можно считать, что лучи совершенно однородны по своему составу.

Если же поглощение для первых нескольких слоев больше, чем для последующих, то лучи имеют сложный характер, т. е. состоят из потоков электронов, различающихся по скорости и, соответственно, по проникающей способности.

После подобных испытаний мы нашли:

1. Уран и возбужденная радиоактивность, обусловленная торием, испускают почти однородные отклоняемые лучи, приблизительно одинаковой проникающей способности.

2. И торий, и радий испускают очень сложные лучи. Это показал Беккерель, исследуя радий с помощью фотографического метода. Он нашел, что магнитное отклонение лучей изменяется в широких пределах. Торий X испускает в значительной части легко поглощаемые отклоняемые лучи.

3. Радий, торий и возбужденная ими радиоактивность испускают какие-то отклоняемые лучи, обладающие приблизительно такой же проникающей способностью, как лучи, испускаемые ураном. Чтобы интенсивность испускаемых лучей уменьшилась в 2 раза, они должны пройти через слой алюминия толщиной около 0,5 *см*.

§ 9. Сравнение величины ионизации, произведенной отклоняемыми и неотклоняемыми лучами

В 1899 г. один из авторов этой работы [6] показал, что окись урана испускает два типа излучения, названные для удобства α- и β-излучениями, причем β-излучение оказалось гораздо более проникающим, чем α-лучи. С помощью электрического метода мы нашли, что *β-излучение состоит почти полностью из отклоняемых лучей* проникающего характера.

Для краткости и удобства мы назовем неотклоняемые лучи *всех* радиоактивных веществ α-лучами, а отклоняемые лучи — β-лучами.

Установка для магнитного отклонения, показанная на рис. 1, подходит для непосредственного сравнения ионизующего действия лучей обоих типов. Однако, поскольку α-лучи во всех случаях легко поглощаются, а мы из опыта нашли, что бóльшая часть проникающих лучей урана, тория и радия отклоняется магнитом, можно применить простой косвенный метод.

Ионизационный ток между двумя большими параллельными металлическими пластинами наблюдался при большой разности потенциалов между пластинами

1) с открытыми радиоактивными веществами,

2) с листом металла поверх вещества, достаточно толстым, чтобы поглотить все неотклоняемые лучи.

В первом случае мы имеем действие как α-, так и β-лучей, во втором — действие одних β-лучей.

Так как количество испускаемых α-лучей практически достигает максимума при очень тонком слое радиоактивного вещества, для сравнения ионизующего действия двух видов лучей лучше всего использовать очень тонкий слой вещества.

В опытной установке на площади около 80 *см*^{2} было равномерно нанесено около 0,1 *г* радиоактивного вещества в виде тонкого порошка. Расстояние между измерительными пластинами составляло 5,7 *см*, а разность потенциалов между ними 300 *в*.

Результаты предыдущих опытов показали, что α-излучения урана, тория и радия, проходя в воздухе расстояние 5 *см*, почти полностью поглощаются, так что ток с открытым веществом был мерой *всего* числа ионов,

создаваемых α-лучами, включая малую долю ионов, создаваемых β-лучами.

Чтобы поглотить полностью α-излучение, оказалось достаточно листика алюминия толщиной 0,009 *см*. Табл. 4 иллюстрирует количественную связь между ионизующим действием α- и β-лучей в условиях опыта.

Таблица 4

Вещество	Полная ионизация α-лучей	Ионизация β-лучей	β/α
Уран	1	1	0,0074
Торий	1	0,27	0,0020
Радий	2000	1350	0,0033

В приведенной таблице полное число ионов, создаваемых в каждом случае α- и β-лучами урана, принимается для сравнения за единицу. Последний столбец дает фактическое отношение β к α, полученное для равных весов вещества.

Результаты только приблизительные, так как ионизующее действие лучей от заданного веса вещества зависит от тонкости его помола.

Заметим, что отношение ионизации β/α наибольшее для урана и наименьшее для тория. Интенсивность α- и β-лучей радия, конечно, зависит от его чистоты. В этом опыте был применен радий, полученный из Парижа. Радий от П. де Хаена из Ганновера дал похожие результаты.

При увеличении толщины слоя радиоактивного вещества отношение ионизаций β/α непрерывно уменьшается до постоянной величины, так как α-лучи легче поглощаются самим радиоактивным веществом, чем β-лучи.

§ 10. Сравнение энергии, излучаемой α- и β-лучами

Если предположить, что

1) для образования одного иона как α-, так и β-лучами требуется одинаковая энергия и

2) вся энергия, излучаемая в воздух радиоактивным веществом, расходуется на создание ионов, то можно приблизительно оценить отношение энергий, излученных α- и β-лучами.

Если λ — коэффициент поглощения воздухом отклоняемых лучей, то скорость образования ионов в единице объема на расстоянии от источника есть $qe^{-\lambda x}$, где q — скорость ионизации у источника.

Общее число ионов, образованных при полном поглощении лучей, выражается следующим образом:

$$\int_0 qe^{-\lambda x}dx = \frac{q}{\lambda}.$$

В настоящее время трудно экспериментально измерить λ для воздуха, но мы можем получить приблизительную оценку его величины из результатов Ленарда, который показал, что поглощение катодных лучей пропорционально плотности данного вещества и не зависит от его химической природы.

Величина λ алюминия для β-лучей, испускаемых ураном, равна около 14 и, поделив это значение на плотность алюминия, получаем 5,4. Приняв плотность воздуха равной 0,0012, находим для воздуха

$$\lambda = 0{,}0065.$$

Таким образом, общее число ионов, образованных в воздухе, равно 154 q, если лучи поглощены полностью.

Из табл. 4 видно, что ионизация отклоняемых лучей составляет 0,0074 от числа ионов, образованных α-лучами, когда β-лучи проходят в воздухе расстояние 5,7 *см*.

Следовательно, приближенно

$$\frac{\text{Общее число ионов, образованных } \beta\text{-лучами}}{\text{Общее число ионов, образованных } \alpha\text{-лучами}} = \frac{0{,}0074}{5{,}7} \cdot 154 = 0{,}2.$$

Итак, около $^1/_6$ энергии, излучаемой в воздух ураном, уносится электронами. Для тория это отношение приблизительно равно $^1/_{22}$, а для радия — около $^1/_{14}$, в предположении, что их лучи имеют примерно то же среднее значение λ.

Этот расчет учитывает лишь энергию, излученную в окружающий газ, но, учитывая ту легкость, с которой лучи поглощаются даже тонким слоем, бóльшая часть излучения поглощается самим радиоактивным веществом. Что дело обстоит именно так, говорит тот факт, что α-излучение тория или радия уменьшается наполовину, пройдя через алюминий толщиной около 0,0005 *см*. Приняв во внимание большую плотность радиоактивного вещества, кажется вероятным, что бóльшая часть излучения, улетучивающегося в воздух, обусловлена тонким слоем порошка толщиной немногим более 0,0001 *см*.

Однако мы можем оценить относительную долю энергии излучения, уносимую α- и β-лучами, следующим образом.

Полная энергия W_1, излучаемая к поверхности слоем толщиной d, определяется выражением

$$W_1 = \frac{1}{2}\int_0^d E_1\sigma e^{-\lambda_1 x}dx = \frac{E_1\sigma}{2\lambda_1}(1 - e^{-\lambda_1 d}) = \frac{E_1\sigma}{2\lambda_1},$$

если $\lambda_1 d$ велико.

Для простоты допустим, что толстый слой радиоактивного вещества равномерно распределен по большой плоской поверхности. В этом случае, кажется, нет сомнений, что излучение испускается равномерно каждой

порцией массы; следовательно, излучение, производящее действие в газе над радиоактивным слоем, есть сумма всех излучений, достигающих поверхности слоя. Пусть λ_1 — средний коэффициент поглощения лучей в радиоактивном веществе, σ — удельный вес вещества, E_1 — полная энергия, излучаемая в 1 *сек* единицей массы вещества, причем поглощением лучей в самом веществе пренебрежем. Энергия, излучаемая в 1 *сек* к поверхности слоем толщиной dx и единичной площади, находящейся на расстоянии x от поверхности, дается выражением

$$\frac{1}{2} E_1 \sigma e^{-\lambda_1 x} dx.$$

Подобным же путем можно показать, что энергия W_2, излучаемая в 1 *сек* β-лучами, для очень толстого слоя выражается как

$$W_2 = \frac{E_2 \sigma}{2\lambda_2},$$

где E_2 — полная скорость излучения энергии единицей массы, если пренебречь поглощением; λ_2 —коэффициент поглощения лучей в веществе. Следовательно

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} \frac{\lambda_2}{\lambda_1},$$

или

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{W_1}{W_2}.$$

Трудно непосредственно определить λ_1 и λ_2 для самого радиоактивного вещества. Возможно, однако, что их отношение не сильно отличается от отношения коэффициентов поглощения для другого вещества, например алюминия, для которого оно было определено непосредственно. Это следует из общего положения, что поглощение α- и β-лучей в каком-либо веществе приблизительно пропорционально плотности вещества.

Отношение числа ионов, образованных α-лучами, к числу ионов, образованных β-лучами, W_1/W_2 может быть определено способом, уже описанным для тонкого слоя.

Отношение E_1/E_2 было определено для урана из следующих экспериментальных данных. Толстый слой окиси урана был распределен по площади 22 *см*^{2}, и определялось отношение токов, созданных α- и β-лучами между двумя параллельными пластинами, отстоящими одна от другой на 6,1 *см*. Оказалось, что

$$\frac{\text{Ток, обусловленный } \alpha\text{-лучами}}{\text{Ток, обусловленный } \beta\text{-лучами}} = 12{,}7.$$

Таким образом,

$$\frac{W_1}{W_2}=\frac{\text{Полное число ионов, обусловленное } \alpha\text{-лучами}}{\text{Полное число ионов, обусловленное } \beta\text{-лучами}}=\frac{12{,}7\cdot 6{,}1}{154}\approx 0{,}5,$$

поскольку мы предварительно рассчитали, что число ионов, создаваемых β-лучами, в 154 раза больше числа ионов, созданных при расстоянии между пластинами 1 *см* [11].

Теперь

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{\lambda_1 W_1}{\lambda_2 W_2}=\frac{0{,}5\lambda_1}{\lambda_2}=\frac{0{,}5\cdot 2740}{14}=100 \text{ приблизительно},$$

так как для алюминия $\lambda_1 = 2740$ для α-лучей и $\lambda_2 = 14$ для β-лучей.

Отсюда видно, что для урана около $^1/_{1000}$ всей излученной энергии уносится в виде электронов. Это отношение еще меньше для тория и радия. Таким образом, оказывается, что в постоянных радиоактивных веществах вылетающие электроны уносят только малую долю рассеиваемой энергии.

§ 11. Обсуждение результатов

Мы видели, что три хорошо изученные радиоактивные вещества — уран, торий и радий — излучают как отклоняемые, так и неотклоняемые лучи. В этом отношении они отличаются от полония, который не испускает отклоняемых лучей. Как отметил Беккерель, почти несомненно, что полоний (радиоактивный висмут) нельзя считать постоянным радиоактивным веществом, так как его излучение непрерывно уменьшается со временем.

Мы показали, что по сравнению с радием или торием уран испускает больше отклоняемых лучей, чем неотклоняемых, но отношение количества лучей обоих типов одного порядка.

При рассмотрении вопроса о связи между α- и β-лучами очень важны результаты химического разделения. По-видимому, можно утверждать, что α-лучи так связаны с β-лучами, как катодные лучи с лучами Рентгена, которые они образуют, так как мы показали, что отделенные от урана и тория активные фракции содержат все вещество, ответственное за β-лучи. Радиоактивные материалы, временно лишенные таким образом β-лучей, все же сохраняют свою способность испускать α-лучи; уран в большой степени, а торий — около 30% первоначального числа α-лучей.

Это α-излучение урана продолжает существовать несколько дней, а α-излучение тория — несколько часов, не изменяя заметно своей интенсивности. Если α-лучи обусловлены непосредственно β-лучами, то необходимо предположить, что излучение существует еще в течение долгого времени после того, как устранен его источник. Эта точка зрения не может объяснить без дополнительных предположений, почему излучение от UX не возбуждает подобного α-излучения в себе самом.

На этой стадии изучения радиоактивности, не вдаваясь в рассмотрение механизма радиоактивности, кажется вероятным, что бо́льшая часть отклоняемых лучей урана и тория вызвана вторичным продуктом, возникающим при распаде атомов или молекул урана и тория. Эти вторичные продукты отличаются по химическим свойствам от урана и тория и могут быть отделены от них химическими способами; таким образом и создаются UX и ThX. Неотклоняемое излучение может быть обусловлено либо другим вторичным продуктом реакции, либо воздействием продукта, ответственного за отклоняемые лучи в массе радиоактивного вещества.

Мак-Гиллский университет, Монреаль,
7 мая 1902 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклады по радиоактивности Беккереля и Кюри на Международном физическом конгрессе, 1900, т. III.
2. *Dorn.* Compt. Rend., CXXX, 1126.
3. *Curie P.* Compt. Rend., CXXX., 647.
4. *Heaviside.* Electrician, April 4, 1902.
5. Gött. Nachr., 11, 1901.
6. *Rutherford E.* Phil, Mag., January, 1899.
7. *Rutherford E.* Phys. Zs., 1902, N 11, 225.
8. *Rutherford E., Soddy F.* Proc. Chem. Soc., January, April. 1902.
9. *Rutherford E., Soddy F.* Trans. Chem. Soc.
10. *Crookes W.* Proc. Roy. Soc., May, 1900.
11. *Becquerel A.* Compt. Rend., December 9, 1901.
12. *Rutherford E.* Phil. Mag., June, 1902.

ПРИЧИНА И ПРИРОДА РАДИОАКТИВНОСТИ *

ЧАСТЬ I

(Совместно с Ф. Содди)

Содержание

I. Введение
II. Экспериментальные методы исследования радиоактивности
III. Выделение радиоактивного компонента ThX из соединений тория
IV. Скорости восстановления и уменьшения радиоактивности тория
V. Химические свойства ThX
VI. Непрерывное образование ThX
VII. Влияние различных условий на превращения в тории
VIII. Причина и природа радиоактивности
IX. Начальные участки кривых уменьшения и восстановления активности
X. Неотделимая радиоактивность тория
XI. Природа излучений тория и ThX
XII. Сводка результатов
XIII. Общие теоретические соображения

I. Введение

В предлагаемой статье приведены результаты подробного исследования радиоактивности соединений тория, освещающие вопросы, связанные с источником и поддержанием энергии, рассеиваемой радиоактивными веществами. Показано, что радиоактивность сопровождается химическими превращениями, в результате которых непрерывно возникают новые виды вещества. Продукты этих реакций сначала радиоактивны, причем их радиоактивность непрерывно уменьшается с момента их образования. Непрерывное образование этих веществ поддерживает радиоактивность производящих их веществ в состоянии определенного равновесия. Делается вывод, что эти химические превращения должны носить внутриатомный характер.

Отправной точкой данных исследований служили уже известные свойства радиоактивного тория [1]. Помимо того, что соединения тория радиоактивны в том же смысле, что и соединения урана, они еще непрерывно выделяют в окружающую атмосферу газ, обладающий временной радиоактивностью. Эта «эманация», как она была названа, испускает лучи, ионизующие газы и затемняющие фотографическую пленку [1].

---

* Philosophical Magazine, September, 1902, ser. 6, 4, 370—396.

[1] Если окись тория нагреть до белого каления, то ее способность выделять эманацию в значительной степени нарушится. Обработанный таким образом торий мы будем называть «деэманированным».

Наиболее удивительное свойство эманации тория заключается в ее способности возбуждать радиоактивность на всех поверхностях, с которыми она соприкасается. Вещество, подвергнутое в течение некоторого времени действию эманации, ведет себя так, как будто оно покрыто невидимым слоем сильно активного материала. Если поместить торий в сильное электрическое поле, то возбужденная радиоактивность полностью сосредоточивается на отрицательно заряженной поверхности. Таким способом можно сконцентрировать возбужденную радиоактивность на очень малой площади. Возбужденная радиоактивность может быть удалена трением или растворением в кислотах — соляной, серной или плавиковой. После испарения кислоты радиоактивность остается на посуде.

Способность соединений тория выделять эманацию не зависит от окружающей атмосферы, а полученная возбужденная активность не зависит от природы вещества, на котором она обнаруживается. Эти свойства заставляют думать, что оба явления, по-видимому, вызваны незначительными количествами особого вещества в радиоактивном состоянии, созданного соединением тория.

И еще одно соображение относительно радиоактивности — активность в любом случае систематически уменьшается с течением времени, причем интенсивность излучения в каждый момент времени пропорциональна количеству оставшейся неизлученной энергии. У эманации активность падает вдвое в течение 1 *мин*, а у возбужденной радиоактивности — в течение 11 *час*.

Эти явления — образование радиоактивного вещества и рассеяние энергии путем излучения,— которые проявляются у соединений тория во вторичных эффектах способности выделять эманацию и создавать возбужденную радиоактивность, фактически наблюдаются во всех проявлениях радиоактивности. Постоянная радиоактивность радиоактивных элементов есть результат равновесия этих двух противоположных процессов.

II. Экспериментальные методы исследования радиоактивности

Для изучения радиоактивности применяются два метода — электрический и фотографический. Фотографический метод имеет скорее качественный, нежели количественный характер; результаты, полученные с его помощью, накапливаются со временем, и, как правило, для проявления радиоактивности такого слабого агента, как торий, необходимы большие экспозиции. Кроме того, как показал Рассел, потемнение фотопластинки вызывается также факторами совсем иного порядка, нежели рассматриваемые, и, более того, при самых обычных условиях. Вильям Крукс [2] своевременно предостерег от слишком большого доверия к фотографическому методу при изучении радиоактивности. Неопределенность эффекта, произведенного кумулятивным действием в течение длительного времени, исключает использование этого метода для работ, не носящих качественный характер.

Но наиболее серьезное возражение против фотографического метода вызвано тем, что некоторые типы лучей радиоактивных веществ, сильно ионизующие газы, слабо действуют на чувствительную пленку, если действуют вообще. Эти фотографически неактивные лучи, несомненно, составляют наибольшую часть общего излучения урана и поэтому в предыдущих работах по урану, проведенных фотографическим методом, многое должно быть истолковано по-другому [3].

С другой стороны, электрический метод позволяет сравнивать интенсивность излучений очень быстро и с ошибкой, не превышающей 1—2%. Эти методы основаны на свойстве, присущем всем излучениям рассматриваемого типа,— на свойстве превращать газ в проводник положительного и отрицательного электричества.

Как будет показано, эти методы обладают высокой чувствительностью и однозначностью. Обыкновенный квадрантный электрометр позволяет обнаружить и измерить разность потенциалов по меньшей мере в 10^{-2} *в*. При использовании специальных приборов эту чувствительность можно увеличить в 100 раз. Средняя величина емкости электрометра и соединений составляет $3 \cdot 10^{-5}$ *мкф*; если зарядить ее до 10^{-2} *в*, то запасенное количество электричества составит $3 \cdot 10^{-13}$ *кулон*. При электролизе воды 1 *г* водорода переносит заряд в 10^5 *кулон*. Предположив для примера, что проводимость газов аналогична проводимости жидкостей, получаем, что количество электричества, запасенное в электрометре, соответствует переносу массы водорода, равной $3 \cdot 10^{-18}$ *г*, что примерно в 10^{12} раз меньше того, что может быть обнаружено с помощью весов. На более чувствительном приборе можно было бы обнаружить еще меньшее количество.

На примерах радия в ураните и радиоактивности, возбужденной торием, известно, что вещество в количестве, не поддающемся определению ни весами, ни спектроскопом, производит сравнительно большой ионизационный эффект.

Электрометр дает также возможность распознавать и различать эманации и излучения различных химических веществ. Например, эманацию тория по скорости уменьшения активности можно мгновенно отличить от эманации радия; хотя разница в скорости уменьшения их активности сама по себе не доказывает существенного различия в природе веществ, тождественность же скоростей уменьшения активности во всяком случае служит веским основанием предполагать тождественность их природы.

С другой стороны, излучения можно сравнивать по их проникающей способности [4]. Если пропускать лучи различных радиоактивных веществ через несколько последовательных слоев алюминиевой фольги, то каждый добавочный слой фольги снижает излучение на некоторую часть его прежней величины. Можно вычертить кривую зависимости интенсивности лучей от толщины проницаемого металла, которая наглядно показывает проникающую способность исследуемых лучей. Полученные таким способом кривые весьма различны для разных радиоактивных веществ. Излучения урана, радия, тория — каждое дает особую и характерную

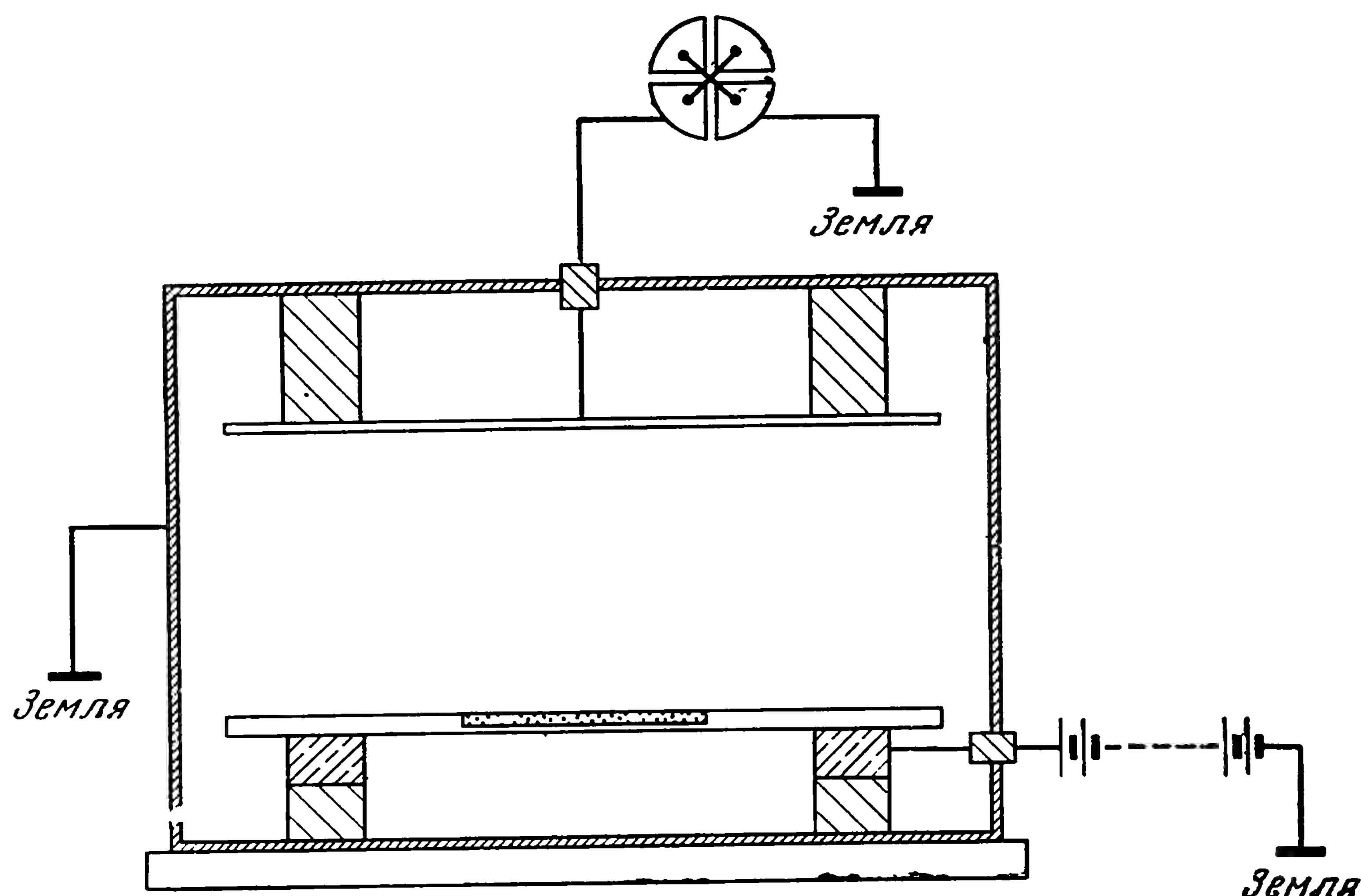


Рис. 1

кривую, причем кривая тория, в свою очередь, весьма резко отличается от кривой возбужденной радиоактивности, созданной эманацией тория. Как недавно было установлено [5], соединения тория помимо лучей типа легко поглощаемых лучей Рентгена, не отклоняемых в магнитном поле, излучают также лучи чрезвычайно проникающего характера, отклоняемые магнитным полем. Следовательно, последние подобны катодным лучам, состоящим, как известно, из материальных частиц, движущихся со скоростью, приближающейся к скорости света. Однако доля отклоняемых лучей в излучении тория гораздо меньше, чем в излучении урана и радия. Определение соотношения между отклоняемыми и неотклоняемыми лучами представляет собой новый способ исследования радиоактивности тория.

Таким образом, электрометр обеспечивает возможность изучения радиоактивности методами количественных и качественных исследований, поэтому нет оснований считать, что причина и природа явления не могут быть предметом химического исследования.

На рис. 1 показана общая схема опыта. Предназначенные для испытания образцы соединения весом от 0,5 до 0,1 *г*, измельченные в тонкий порошок, равномерно рассыпались по платиновой пластине площадью 36 *см*². Эта пластинка помещалась на большую металлическую пластину, соединенную с одним полюсом батареи напряжением 300 *в*, второй полюс которой был заземлен. Приблизительно в 6 *см* над ней была помещена изолированная параллельная пластина, а весь прибор во избежание электростатических наводок был заключен в металлический заземленный ящик.

Заштрихованные части на рисунке представляют собой изоляторы. В приборе была сделана дверка, чтобы пластинку можно было быстро поставить на место и быстро удалить. Обе пары квадрантов сначала заземлены. После соединения одной пары с прибором отклонение стрелки от нуля равномерно возрастает со временем: по секундомеру отмечается время, необходимое ей для отклонения на 100 делений шкалы. *Скорость* движения служит мерой ионизационного тока между пластинами. Отношение токов для разных веществ есть относительная мера их радиоактивности.

В этом приборе образец окиси тория весом 0,5 *г* создавал ток $1{,}1 \cdot 10^{-11}$ *а*, которому при средней чувствительности электрометра соответствовало отклонение стрелки на 100 делений за 36 *сек*. В некоторых случаях использовался в 100 раз более чувствительный электрометр Долежалека специальной конструкции. Этот прибор способен измерить радиоактивность 1 *мг* тория. Если вещество выделяет эманацию, ток между пластинами со временем возрастает. В этих условиях, если соединение тория распределено тонким слоем с максимальной излучающей поверхностью, весь эффект, за исключением 1—2%, обусловлен прямым излучением. Даже когда обусловленная эманацией доля эффекта достигала максимума, она составляла очень малую часть всего излучения. Однако эта доля может быть значительно уменьшена, если измерять ток между электродами немедленно после внесения вещества в измерительный прибор. Ее можно полностью устранить, пропуская ток воздуха между электродами для удаления эманации по мере ее образования.

Измеряемый электрометром ток между пластинами сначала увеличивается с ростом напряжения, но скоро достигается такое положение, когда большому приращению напряжения соответствует очень малое увеличение тока. Разности потенциалов в 300 *в* было достаточно для получения тока насыщения, так что все ионы достигали электродов прежде, чем начиналась заметная рекомбинация.

Однако следует сразу отметить, что произвести абсолютное измерение радиоактивности трудно. Излучение тория поглощается наполовину алюминием толщиной 0,0004 *см*, а поскольку окись тория значительно плотнее алюминия, то возможно, что в этом случае излучение ограничено поверхностным слоем глубиной только 0,0001 *см*. Очевидно, что разные образцы, содержащие одинаковый процент тория, но имеющие разные плотности и разный помол, не дадут одинаковой интенсивности излучения. При сравнении двух образцов одного и того же соединения, важно, чтобы конечные стадии их обработки были во всех случаях одинаковыми. Как правило, мы избегали абсолютных измерений такого рода. Однако можно с большой точностью проследить *изменение* радиоактивности любого препарата, оставив его неприкосновенным на той же пластине и сравнивая его с также неприкосновенным эталоном. Бóльшая часть исследований была выполнена этим методом.

III. Выделение радиоактивного компонента из соединений тория

В ходе описанного ниже исследования способности соединений тория выделять эманацию были получены данные об отделении химическими методами сильно радиоактивного компонента. Было замечено, что в некоторых случаях гидроокись тория, осажденная аммиаком из разбавленных растворов нитрата тория, обладает необычно низкой способностью выделять эманацию. Естественно, это потребовало изучения фильтратов и промывных вод, полученных в ходе процесса. Оказалось, что фильтраты неизменно обладали способностью выделять эманацию, хотя по своей природе они не содержат тория. Если фильтрат выпарен до сухости, а соли аммония удалены прокаливанием, то полученные небольшие остатки также проявляют радиоактивность, причем гораздо большую, чем торий равного веса. Обычно эти остатки по весу были порядка 0,001 доли веса первоначальной взятой соли и во много сотен, а в отдельных случаях свыше тысячи, раз активнее тория равного веса. Отделение этим методом активного компонента тория совершенно не зависит от чистоты используемой соли. Благодаря любезности доктора Кнефлера из Берлина, подарившего нам большой образец своего чистейшего нитрата тория, мы смогли проверить это предположение. Упомянутый образец, очищенный в ходе многих процессов, не содержал ни одной примеси, имевшейся в применяемой ранее торговой соли. Однако его радиоактивность и способность выделять эманацию были по меньшей мере так же велики, а остатки после осаждения аммиаком были не менее активны, чем определенные ранее. Эти остатки не содержат тория или, во всяком случае, содержат лишь ничтожные его следы и после повторного растворения в азотной кислоте не дают никакой видимой характерной реакции.

Изучение проникающей способности лучей радиоактивного осадка показало, что это излучение во всех отношениях тождественно излучению обычного тория. В другом опыте была изучена природа эманации такого сильно активного остатка, не содержащего тория. Скорости уменьшения активности этой эманации и эманации обычного тория были одинаковы, и, таким образом, были получены вещества, химически свободные от тория, но в сильной степени обладающие его радиоактивностью.

Оказалось, что гидроокись тория, подвергнутая описанной выше обработке, была вдвое менее радиоактивной, чем окись тория такого же веса. Таким образом, был, казалось, получен ответственный за радиоактивность тория компонент, обладающий специфическими химическими свойствами и активностью, по меньшей мере в 1000 раз большей активности вещества, из которого он был выделен.

Вильяму Круксу [3] удалось выделить из урана радиоактивный компонент большой активности и особой химической природы; он назвал его вещество UX. Сейчас еще мало что известно о действительной природе активного компонента тория, удобно будет, по аналогии, называть его

ThX. Подобно UX, компонент ThX не вступает ни в какие известные аналитические реакции, но появляется в осадках, образованных в его растворах, даже тогда, когда не возникает и речи о его нерастворимости. Это соответствует точке зрения, что он существует в крайне малом количестве и обладает соответственно большой активностью. Даже наиболее активные образцы, вероятно, состоят из некоторого количества ThX, связанного с большим количеством случайной примеси.

Эти результаты получили подтверждение в наблюдениях, сделанных при отделении ThX другим методом. Был проведен опыт многократной промывки тория водой, чтобы посмотреть, как это повлияет на радиоактивность. Этот опыт показал, что из профильтрованных промывных вод можно выделить в осадок небольшие количества вещества, активность которого часто в 1000 раз больше активности первоначального образца. В одном опыте 290 *г* тория в течение долгого времени встряхивали при девяти последовательных промывках, в каждой из которых использовалось 2 *л* дистиллированной воды. Первая промывная вода, содержащая примесь сульфата тория, была отброшена, остальные выпарены на разных стадиях и на каждой стадии отфильтрованы. Один из таких остатков весил 6,4 *мг* и по радиоактивности был эквивалентен 11,3 *г* первоначального тория, а поэтому был, по крайней мере, в 1800 раз более радиоактивным. Он был исследован химически и после превращения в сульфат дал характерную реакцию сульфата тория, осадившись при нагревании из раствора в холодной воде. *Никакого другого вещества, кроме тория, при химическом анализе мы не смогли обнаружить*, хотя, конечно, количество было слишком малым для детального исследования. Проникающая способность излучения этого вещества опять-таки свидетельствует о его тождественности с излучением обычного тория. В другом опыте небольшое количество тория длительное время встряхивали в большом количестве воды. В этом случае после изучения осадка нашли, что его радиоактивность была приблизительно на 20% меньше радиоактивности исходного образца.

Изменение активности тория и ThX со временем. Используемые в наших предыдущих опытах образцы были отложены на время рождественских каникул. Приблизительно через три недели мы обнаружили, что гидроокись тория, обладавшая первоначально едва 36% своей нормальной активности, почти полностью восстановила обычные свойства. С другой стороны, активные остатки, приготовленные обоими методами, почти полностью потеряли свою первоначальную активность. Таким образом, осуществленное химическое разделение оказалось кратковременным. В это время нам попалась статья Беккереля [6], в которой он показывает, что те же явления восстановления и спада активности присущи урану, частично отделенному химической обработкой от его активного компонента.

Сразу же была начата большая серия наблюдений для определения: 1) скорости восстановления активности тория, превращенного в менее активный продукт путем удаления ThX, и 2) скорости убывания актив-

ности отделенного ThX, чтобы выяснить, каким образом связаны эти два процесса. Немедленно результаты привели к заключению, которое можно сформулировать так: радиоактивность тория в любой момент времени есть равнодействующая двух противоположных процессов:

1) образования с постоянной скоростью соединением тория нового активного вещества;

2) уменьшения со временем излучающей способности активного вещества.

Нормальная или постоянная радиоактивность тория есть равновесное состояние, при котором скорость роста радиоактивности, обусловленная образованием нового активного вещества, уравновешивается скоростью уменьшения радиоактивности уже образовавшегося вещества. Цель этой статьи — доказать и развить эту гипотезу.

IV. Скорости восстановления и уменьшения радиоактивности тория

От ThX путем нескольких осаждений аммиаком по описанному способу было отделено некоторое количество чистого нитрата тория. Радиоактивность полученной таким способом гидроокиси проверялась через равные промежутки времени для определения скорости ее восстановления. Для этой цели исходный образец весом 0,5 *г* на время всей серии измерений был оставлен неприкосновенным на пластине, на которой он был рассыпан, и каждый раз сравнивался с 0,5 *г* обычной деэманированной окиси тория, рассыпанной таким же образом на второй пластине и тоже оставленной неприкосновенной. С помощью специального устройства во время измерений над образцом пропускали струю воздуха, что препятствовало влиянию эманации от гидроокиси на результаты.

Активный фильтрат образца был сконцентрирован и доведен до объема 100 $см^3$. Одна четверть его была выпарена до сухости, нитрат аммония был удален прокаливанием в платиновом тигле, радиоактивность остатка измерялась через те же интервалы времени, что и гидроокиси, чтобы определить скорость уменьшения его активности. Эталоном в этом случае служил стандартный образец окиси тория, остававшийся неприкосновенным на металлической пластине, многократное использование которого показало, что он является постоянным источником излучения. Остаток фильтрата был использован для других опытов.

В приведенной таблице дан пример одной из многочисленных серий наблюдений, сделанных на разных образцах в разное время. Максимальное значение, полученное для гидроокиси, и начальное значение для ThX приняты за 100.

Полученные результаты графически представлены на рис. 2, где по оси абсцисс отложено время в днях, а по оси ординат — радиоактивность в процентах. Кривая *2* иллюстрирует скорость восстановления активности тория, а кривая *1* — скорость уменьшения активности ThX. Как видно,

обе кривые имеют особенности в первые два дня. Активность гидроокиси сначала явно уменьшилась и только через два дня достигла первоначального значения, а активность ThX сначала возросла и начинает спадать ниже первоначального значения лишь через два дня (ср. раздел IX). Эти результаты не могут быть приписаны ошибкам измерений, так как они наблюдались каждый раз, когда испытывались подобные образцы. Как показывает кривая, активность остатка, полученного из окиси тория вторым методом — промыванием, убывает почти так же, как и активность ThX.

Если пренебречь начальными участками кривых и принимать во внимание только их дальнейший ход, то сразу же будет видно, что время, необходимое для восстановления гидроокисью половины ее потерянной активности, приблизительно равно времени, необходимому, чтобы ThX потерял половину своей активности — около четырех дней в каждом случае и, вообще, процентная доля утраченной активности, вновь приобретенная гидроокисью в течение любого заданного интервала времени, приблизительно равна процентной доли активности, потерянной ThX в течение того же интервала времени. Если кривую восстановления активности (*2*) продолжить назад без излома до пересечения с вертикальной осью, то видно, что это произойдет минимум при 25%, и приведенный выше результат соблюдается даже более точно, если предположить, что восстановление начинается с этого постоянного минимума. Мы показали (см. раздел IX, рис. 4), что так на самом деле и происходит при соответствующих условиях.

Это положение отражено на рис. 3, представляющем кривую восстановления тория (*2*), на которой по оси ординат отложено процентное количество восстановленной активности, подсчитанное от этого 25%-ного минимума. На этом же рисунке приведена кривая спада активности (*1*) после второго дня в том же масштабе.

Активность ThX уменьшается со временем приблизительно в геомет-

Время, дни	Активность гидроокиси	Активность ThX	Время, дни	Активность гидроокиси	Активность ThX
0	44	100	9	—	29,5
1	37	117	10	83	25,2
2	48	100	13	—	15,2
3	54	88	15	—	11,1
4	62	72	17	96,5	—
5	68	—	21	99	—
6	71	53	28	100	—
8	78	—			

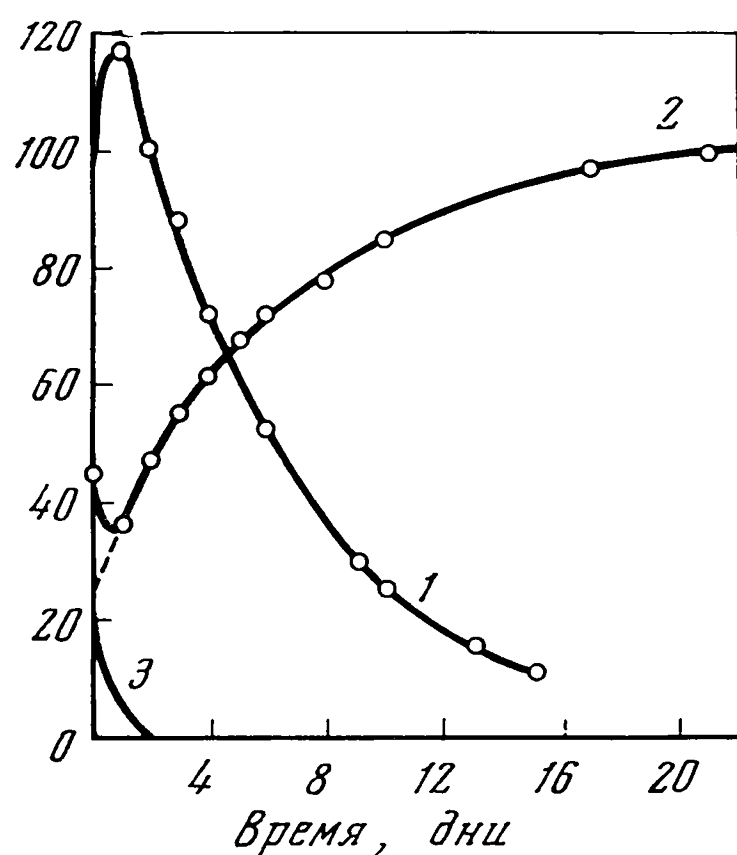


Рис. 2

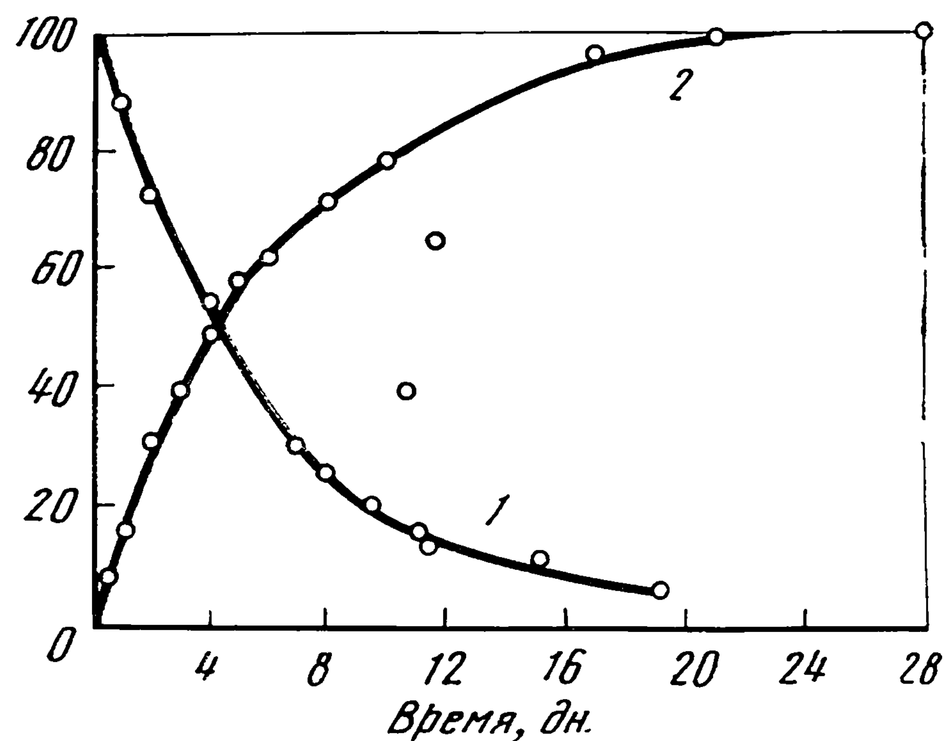


Рис. 3

рической прогрессии, т. е. если через I_0 обозначить начальную активность, а через I_t — активность спустя время t, то

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t}, \qquad (1)$$

где λ — постоянная; e — основание натуральных логарифмов.

Следовательно, экспериментальная кривая, полученная для скорости увеличения активности гидроокиси от минимального значения до максимального, будет приблизительно выражаться уравнением

$$\frac{I_t}{I_0} = 1 - e^{-\lambda t}, \qquad (2)$$

где I_0 — максимальное значение восстановленной активности; I_t — восстановленная активность спустя время t; λ — та же постоянная, что и прежде.

Последнее уравнение было теоретически выведено в других работах (ср. [7]) для описания возрастания до постоянного максимума активности системы, состоящей из излучающих частиц, в которой

1) скорость притока новых излучающих частиц постоянна;

2) активность каждой частицы уменьшается во времени в геометрической прогрессии согласно уравнению (1).

Отсюда следует, что если пренебречь начальной нерегулярностью кривых и предположить, что остаточная активность тория имеет *постоянную* величину, то полученная из опыта кривая восстановления активности будет объяснена при условии, что одновременно имеют место два процесса:

1) активный компонент ThX образуется с постоянной скоростью;

2) активность ThX снижается в геометрической зависимости от времени.

Не касаясь вначале трудных вопросов, связанных с начальной нерегулярностью и остаточной активностью, можно легко проверить опытным путем основной вывод, вытекающий из приведенных кривых. Основная идея состоит в том, что наибольшая часть радиоактивности тория совсем не обусловлена торием, а присутствием в мельчайших количествах неториевого вещества, которое непрерывно воспроизводится.

V. Химические свойства ThX

Тот факт, что торий после осаждения аммиаком из своих растворов оставляет основную часть своей активности в фильтрате, сам по себе не доказывает, что химически отделен материальный *компонент*, ответственный за эту активность. Возможно, что вещество, состоящее из неториевой части раствора, временно становится радиоактивным при соединении с торием и это свойство сохраняется в процессах осаждения, выпаривания и прокаливания и проявляется, наконец, на оставшемся остатке.

Однако можно доказать, что эта точка зрения совершенно несостоятельна, так как тогда любой осадок, способный полностью удалить торий из его раствора, давал бы активные остатки, подобные остаткам от осаждения аммиаком. Происходит, однако, совсем обратное.

Если нитрат тория осаждать карбонатами натрия или аммония, то остаток фильтрата после выпаривания и прокаливания получается неактивным, а карбонат тория обладает нормальной величиной активности.

То же самое наблюдается и тогда, когда в качестве осаждающего вещества применяется щавелевая кислота. Этот реагент даже в сильно кислом растворе осаждает почти весь торий. Если аммиаком превратить фильтрат в щелочной, отфильтровать, выпарить и прокалить, то полученный остаток неактивен.

В случае применения в качестве осаждающего вещества фосфата натрия в обычном кислом растворе осадок более или менее свободен от ThX. После отщелачивания раствора аммиаком остаток тория осаждается как фосфат и уносит с собой весь активный компонент, так что остаток фильтрата и в этом случае неактивен. Фактически из всех опробованных реагентов только аммиак способен отделить ThX от тория.

Здесь уместно напомнить результат исследования урана Вильямом Круксом, который мы подтвердили электрическим методом. В этих исследованиях UX полностью осаждался аммиаком вместе с ураном, а остаток, полученный выпариванием фильтрата, совсем неактивен.

Поэтому не может быть сомнений в том, что как ThX, так и UX — особые виды вещества со специфическими химическими свойствами. Любая гипотеза, пытающаяся объяснить восстановление со временем активности тория и урана, неизбежно должна начинаться с этой важнейшей концепции.

VI. Непрерывное образование ThX

Если восстановление активности тория со временем обусловлено образованием ThX, то можно получить опытное доказательство этого процесса. Первое, что нужно установить,— это, насколько удаление ThX указанным методом снижает полную радиоактивность тория. Предварительная проба показала, что наиболее благоприятные для разделения условия — это осаждение разведенным аммиаком в горячих разбавленных растворах. Таким способом был осажден аммиаком полученный от изготовителя образец нитрата тория весом 5 *г*; осадок был растворен в азотной кислоте и снова осажден при тех же условиях, причем все операции проводились *незамедлительно* одна после другой.

После удаления ThX измерялись активности остатков, получаемых из последовательных фильтратов. Активность ThX из первого фильтрата была эквивалентна 4,25 *г* тория, из второго — 0,33 *г*, из третьего — 0,07 *г*. Двумя осаждениями удается удалить практически весь ThX. Радиоактивность отделенной гидроокиси была равна 48% активности стандартного деэманированного образца тория.

Скорость образования ThX. Некоторое количество раствора нитрата тория, освобожденного от ThX приблизительно за месяц до этого, было вновь подвергнуто такой же обработке. В одном из опытов, в котором было использовано 10 *г* этого нитрата, активность остатка фильтрата была эквивалентна 8,3 *г* окиси тория. Этот опыт осуществлялся в один день с описанным выше опытом, когда было использовано 5 *г* нового нитрата, и, как будет показано, в обоих случаях активность фильтратов была одинаковой. За один месяц активность ThX в соединении тория снова достигает своего максимального значения.

Если между последовательными осаждениями проходит 24 *час*, то активность образованного за это время ThX соответствует приблизительно $^1/_6$ максимальной активности всего примененного тория. Через 3 *час* активность образовавшегося вещества приблизительно равна $^1/_{30}$. Скорость образования ThX, подсчитанная с учетом этих цифр, хорошо согласуется с формой кривой, полученной для восстановления активности тория, если принять, что последняя отображает непрерывное образование ThX с постоянной скоростью, а его активность уменьшается со временем в геометрической прогрессии.

Применяя чувствительный электрометр, можно проследить ход образования ThX через очень короткие интервалы времени. Если работать с 10 *г* нитрата тория, то количество вещества, образовавшегося за минимально необходимое для выполнения последовательных осаждений время, равно такому количеству, которое может быть с легкостью измерено. При увеличении интервала между измерениями эффект выходит за пределы диапазона прибора, если не уменьшить его чувствительность в несколько раз по сравнению с нормальной путем введения в систему емкостей. В опытах с такими активными остатками часто использовались

емкости 0,01 и 0,02 *мкф*, снижающие чувствительность более чем в 200 раз по сравнению с обычной.

Процесс образования ThX непрерывен, и никакого изменения в количестве вещества, образованного в течение заданного времени, после повторных разделений не наблюдалось. В одном из опытов, выполненном с другой целью (см. раздел IX), после 23 последовательных осаждений, длившихся свыше 9 дней, количество вещества, образовавшееся в течение последнего интервала, насколько можно судить, было не меньше образовавшегося в начале процесса.

Таким образом, когда в качестве измерительного прибора используется электрометр, явление радиоактивности позволяет обнаружить и измерить за несколько минут происходящие в веществе превращения, которые не могли быть обнаружены с помощью весов и о существовании которых даже не подозревали.

VII. Влияние различных условий на превращения в тории

Как было показано, в соединениях тория уменьшение радиоактивности со временем уравновешивается непрерывным образованием нового активного вещества. Превращение, в результате которого образуется это вещество, должно быть химическим по природе, так как продукты реакции отличаются по химическим свойствам от тория, из которого они образовались. Первый шаг в изучении природы этого превращения состоит в изучении влияния различных условий на его скорость.

Влияние различных условий на скорость спада активности. Активность продуктов реакции представляет способ количественного измерения превращений, поэтому следует прежде всего определить влияние различных условий на скорость ее уменьшения. Оказалось, что на скорость спада активности, как и на все другие типы временной радиоактивности, не влияет ни один из известных факторов. Ее не изменяют ни прокаливание, ни химическая обработка, а то вещество, которое ее вызвало, может быть растворено в кислотах без изменения активности и снова получено при испарении раствора. Следующий опыт показывает, что активность снижается как в растворе, так и в твердом теле с одинаковой скоростью. Остаток раствора, примененного для определения кривой распада ThX (см. рис. 2), был оставлен на 12 дней, по истечении которых вторая четверть его была выпарена до сухости и прокалена, а ее активность сравнивалась с активностью первой четверти, оставленной после выпаривания в платиновом сосуде. Сравнение активностей этих двух образцов показало, что они равны, что указывало на равную скорость спада активности, несмотря на совсем различные условия получения этих двух частей. Через 19 дней была выпарена третья четверть, и ее активность, к тому времени уже очень малая, была неотличима от активности первой выпаренной части. Вторичное растворение остатков, после того как активность спала, не восстанавливает ее.

Таким образом, активность ThX снижается со скоростью, не зависящей ни от химического, ни от физического состояния молекулы.

Таким образом, скорость восстановления активности соединений тория при различных условиях служит прямым показателем скорости образования ThX при этих же условиях. Были осуществлены следующие опыты.

Одна часть гидроокиси тория, только что отделенная от ThX, была помещена в вакуум, созданный хорошим насосом Теплера, а другая часть выставлена на воздух. Сравнение образцов через 12 дней не позволило обнаружить какой-либо разницы между ними ни по радиоактивности, ни по способности выделять эманацию.

В следующем опыте навеска гидроокиси, свободной от ThX, была разделена на две равных части, одну из которых поставили в платиновом тигле на 20 *час* в пламя бунзеновской горелки, а потом сравнили с другой. Никакой разницы в активности не обнаружено. Такой же результат был получен и в другом опыте, где одну половину прокаливали в течение 20 *мин* паяльной лампой, а потом сравнили со второй. Таким образом, разность температур и превращение гидроокиси тория в окись никак не влияют на активность.

Несколько опытов, предназначенных для проверки наиболее сильным способом влияния химического состояния молекулы на скорость образования ThX, выявили некоторые незначительные особенности, которые почти наверняка следует приписать другим причинам. Ниже будет показано (см. раздел IX), что нормальная активность окиси тория при обычных условиях почти на 21% состоит из вторичной активности, возбужденной в массе вещества. Эта часть, конечно, не постоянна, и поскольку она распределена по всему объему имеющегося вещества, то условия структуры материала и т. п. будут влиять на ее величину. Это влияние возбужденной радиоактивности тория затрудняет получение определенного ответа на данный вопрос, поэтому заключение о независимости скорости образования ThX от молекулярных условий нельзя считать окончательным. Описанный ниже опыт делает его вполне вероятным.

Навеска нитрата тория, полученная от изготовителя, была превращена в окись в платиновом тигле путем обработки серной кислотой и прокаливанием до белого каления. Полученная деэманированная окись была рассыпана по пластинке, и в течение первой недели после приготовления образца регистрировалось малейшее, какое только можно было обнаружить в этих условиях, изменение радиоактивности во времени. Ничего обнаружено не было, тогда как при различных скоростях образования ThX в нитрате тория и в окиси изменилась бы точка равновесия, в которой спад и рост активности уравновешиваются. Следовательно, должны были бы происходить логарифмический подъем или спад от старого до нового значений. Однако радиоактивность остается постоянной, поэтому кажется весьма вероятным, что рассматриваемые превращения не зависят от молекулярного состояния.

Как будет видно в дальнейшем (ср. раздел IX), здесь сделано предположение, что доля возбужденной радиоактивности в обоих соединениях одна и та же, и по этой причине были выбраны соединения, обладающие низкой способностью выделять эманацию.

Уран — значительно более простой пример радиоактивного вещества, чем торий, так как у него отсутствуют явления возбужденной радиоактивности и способности выделять эманацию. Отделение UX и восстановление активности урана со временем кажутся, однако, аналогичными этим процессам в тории; в настоящее время исследуются скорости восстановления и спада активности урана. Предполагается исследовать влияние различных условий на скорость превращения урана более тщательно, поскольку вторичные превращения в этом случае не искажают явления.

VIII. Причина и природа радиоактивности

Изложенные выше выводы позволяют сделать значительные обобщения в вопросе о радиоактивности. Энергетические соображения требуют, чтобы интенсивность излучения любого источника затухала со временем, если нет постоянного подвода энергии для компенсации ее убыли при излучении. Оказалось, что это справедливо для всех известных типов радиоактивности, за исключением «естественно» радиоактивных элементов (наиболее известные — торий, уран и радий). Позднее будет показано, что радиоактивность эманации, образованной соединениями тория, в любых условиях убывает со временем по геометрической прогрессии и не поддается влиянию наиболее сильнодействующих химических и физических воздействий. Как было показано одним из нас [8], то же самое остается верным и для возбужденной радиоактивности, созданной эманацией тория. Эта эманация убывает с одинаковой скоростью и на проволоке, на которой она была первоначально осаждена, и в растворе соляной или азотной кислоты. Возбужденная радиоактивность, созданная излучением радия, по-видимому, ведет себя аналогичным образом. Все эти примеры удовлетворяют энергетическим соображениям. Однако в случае трех природных радиоактивных элементов, очевидно, должно существовать непрерывное возмещение рассеянной энергии, но до сих пор этому явлению не дано удовлетворительного объяснения.

Полученные нами результаты проясняют природу этого процесса. Материальный компонент, ответственный за радиоактивность, будучи отделен от создающего его тория, ведет себя так же, как и другие упомянутые типы радиоактивности. Его активность убывает со временем геометрически, и скорость исчезновения активности не зависит от молекулярных условий. Однако постоянство величины нормальной радиоактивности поддерживается химическим превращением, при котором образуется новое радиоактивное вещество со скоростью, тоже не зависящей от внешних условий. Энергия, необходимая для поддержания излучения, находит

свое объяснение, если мы предположим, что энергия системы после превращений стала меньше, чем была до этого.

Работы Крукса и Беккереля по отделению UX и восстановлению активности урана со временем, по-видимому, подтверждают справедливость такого же объяснения и для этого элемента. Работы супругов Кюри, открывших радий, доказывают, что это вещество легко переносит временное уменьшение активности в результате химической обработки и что через некоторое время она восстанавливается до нормальной величины; это легко может быть объяснено с новой точки зрения. Таким образом, все известные типы радиоактивности могут быть сведены к одному виду.

IX. Начальные участки кривых уменьшения и восстановления активности

Изучение кривых восстановления и уменьшения активностей тория и ThX наводит на мысль, что радиоактивность тория поддерживается образованием ThX с постоянной скоростью. Прежде чем это можно будет считать твердо установленным, следует выяснить два спорных вопроса: 1) Что означают начальные участки кривых? Восстановленная активность вначале уменьшается, а затем растет, а кривая спада активности вначале возрастает, а потом уменьшается. 2) Почему удаление ThX не уничтожает полностью активность? На значительную часть первоначальной радиоактивности удаление ThX не оказывает влияния.

Изучение кривых рис. 2 показывает, что в каждом случае, вероятно, действуют две причины. Можно предположить, что происходит нормальный спад и восстановление активности, но они замаскированы одновременным подъемом и спадом, вызванными другими причинами. На основании того, что нам известно о радиоактивности тория, было высказано предположение, что, возможно, происходит некое воздействие, подобное производимому эманацией возбужденной радиоактивности на окружающие неактивные вещества. Ниже будет показано, что именно ThX, а не торий служит причиной способности соединений тория выделять эманацию. С этой точки зрения остаточная активность тория может состоять полностью или частично из вторичной или возбужденной радиоактивности, создаваемой во всей массе соединения тория присутствием ThX. С этой точки зрения спад на кривой восстановления, вероятно, обусловлен спадом возбужденной радиоактивности, протекающим одновременно с явлением восстановления ThX и сначала превышающим его. Подъем на кривой уменьшения активности отражает ее возрастание, вызванное радиоактивностью, возбужденной ThX в веществе, с которым он связан, причем этот подъем больше уменьшения, обусловленного спадом активности ThX. Эту гипотезу легко проверить на опыте. Если удалять из тория на протяжении достаточно длительного времени ThX, по мере его образования, то он не будет создавать в тории возбужденную активность, а наличная возбужденная активность самопроизвольно уменьшается.

Поэтому был осуществлен такой опыт. Некоторое количество нитрата для удаления ThX было осаждено как гидроокись; осадок растворялся в азотной кислоте и еще раз осаждался через определенное время. Время от времени часть гидроокиси отбирали и измеряли ее радиоактивность. Таким способом торий был осажден за 9 дней всего 23 раза, и его радиоактивность снизилась до постоянного минимума. Ниже приведены полученные результаты.

	Активность гидроокиси, %
После первого осаждения	46
После осаждений через три интервала по 24 *час* каждый	39
Еще через три интервала по 24 *час* каждый и еще через три по 8 *час* каждый	22
Еще через три по 8 *час* каждый	24
Еще через шесть по 4 *час* каждый	25

Итак, достигнутый постоянный минимум — около 25% начальной активности (почти на 21% ниже полученного двумя последовательными осаждениями без интервала между ними) — показывает, что процесс позволил удалить весь отделимый ThX. Затем была измерена скорость восстановления этой 23 раза осажденной гидроокиси (рис. 4). Как видим, она теперь не имеет особенностей, и начальное падение, характерное для обычной кривой, совсем отсутствует; фактически эта кривая почти полностью совпадает с обычной кривой (см. рис. 2), продолженной назад до пересечения с вертикальной осью, и поэтому нет сомнений, что налицо остаточная активность тория, по-видимому, не связанная с ThX и составляющая около $^1/_4$ полной активности.

Рассмотрим кривые спада активности ThX, отделенного в этом опыте через различные интервалы времени в течение нескольких первых дней. Все они через 18 *час* имеют начальный подъем приблизительно на 15%, а потом нормальный спад до нуля. Таким образом, доказано, что начальные нерегулярности вызваны вторичным излучением, возбужденным ThX на окружающем веществе. Соответствующим выбором условий можно сделать кривые восстановления нормально поднимающимися от постоянного минимума и показать, что кривые уменьшения активности состоят из двух кривых — первой, соответствующей скорости образования возбужденной радиоактивности, и второй, соответствующей скорости спада общей активности.

До сих пор еще ничего не было сказано о возбужденной радиоактивности, составляющей 21% общей активности тория, — такая же она или отличается от известного вида радиоактивности, образуемого эманацией тория. Все, что можно предположить о ней, сводится к тому, что она должна подчиняться тому же общему закону, т. е. эффект должен воз-

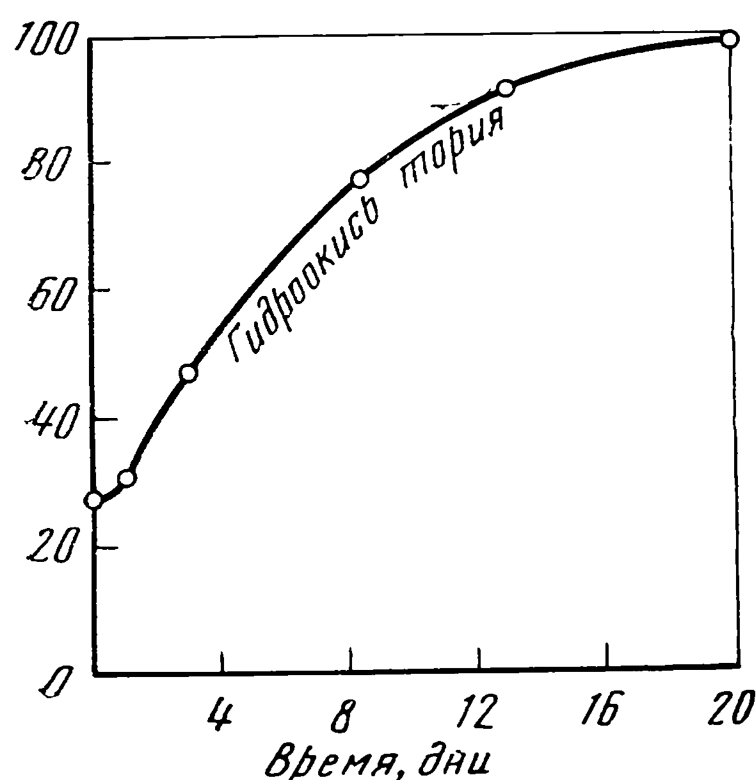


Рис. 4

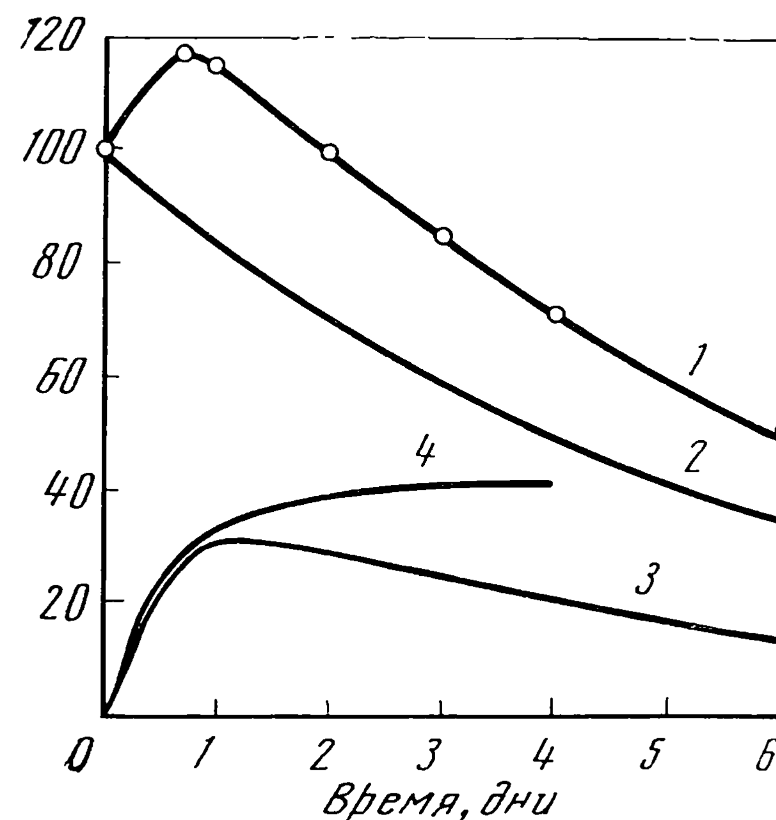


Рис. 5

растать с увеличением времени действия возбуждающей причины и уменьшаться со временем после ее устранения.

Если из приведенных на рис. 5 кривых подсчитать скорость возрастания возбужденной активности, то окажется, что она совпадает со скоростью возрастания обычной возбужденной активности, т. е. увеличивается до половины максимальной величины приблизительно за 12 *час*. Кривая *1* — наблюдаемая кривая активности спада ThX, кривая *2* — теоретическая кривая, построенная в предположении, что активность убывает со временем геометрически и падает вдвое за 4 дня. Кривая *3* — это разница между двумя первыми, и поэтому она изображает кривую возбужденной активности. Кривая *4* — экспериментальная кривая, полученная для роста радиоактивности, возбужденной эманацией тория, когда возбуждающая причина постоянна. Однако в нашем случае возбуждающая причина (ThX) не постоянна, а сама спадает вдвое за 4 дня, поэтому разностная кривая сначала почти совпадает с соседней, а затем с течением времени отходит от нее и, наконец, спадает до нуля. Поэтому нет причин сомневаться в том, что эффект тот же, что и от эманации тория, которая сама по себе есть вторичный эффект ThX. Кривая *3* на рис. 2 представляет собой аналогичную разностную *кривую спада* возбужденной активности, начерченную по *кривой восстановления* тория.

Поскольку этот эффект возбужденной активности создается эманацией, то кажется разумным предположить, что он будет тем больше, чем меньше эманации удастся выделиться в радиоактивном состоянии, а поэтому деэманированные соединения должны обладать большей долей возбужденной радиоактивности, нежели соединения с большой способностью выделять эманацию. Этот вывод был проверен на образце карбоната тория, обладающего в 5 раз большей способностью выделять эманацию, чем

обычный торий. Образец был превращен в окись и деэманирован интенсивным прокаливанием. Энергия, которая раньше выделялась в виде эманации, теперь, за исключением нескольких процентов, осталась в образце. Радиоактивность приготовленной таким образом окиси в первые три дня выросла приблизительно на 30% своей начальной величины; таким образом, есть основания считать, что возбужденная радиоактивность вносит гораздо больший вклад в соединения тория, не выделяющие эманацию, нежели в соединения, обладающие способностью выделять эманацию.

X. Неотделимая радиоактивность тория

Пока еще не найдено каких-либо средств удалять из тория остаточную активность; остается еще рассмотреть, какое место занимает эта часть в схеме радиоактивности тория. Пренебрегая мнением, что это особое явление, не связанное с основной частью активности, можно для объяснения существования этой части в соответствии с развитыми взглядами на природу радиоактивности выдвинуть две гипотезы, допускающие экспериментальную проверку.

Во-первых, если бы существовал второй тип активности, возбуждаемый ThX, подобный известной, но с очень малой скоростью распада, то это объяснило бы существование неотделимой активности. Если это верно, то химическими методами нельзя отделить торий от этой активности, однако непрерывное удаление ThX в течение очень долгого времени, как в приведенном выше случае, вызвало бы его спонтанный спад.

Во-вторых, если при превращении, приводящем к ThX, одновременно образуется и второе вещество, т. е. если это скорее разложение, нежели деполимеризация, то это второе вещество, по всей вероятности, тоже радиоактивно и вызывает остаточную радиоактивность. С этой точки зрения второе вещество тоже должно было бы поддаваться отделению химическими методами, хотя оно должно быть более похоже на торий, чем на ThX, что определенно следует из неудачи уже опробованных методов. Но пока оно не отделено от образовавшего его тория, его активность не будет спонтанно распадаться. Поэтому все, что считается доказанным для ThX, будет справедливо и для второго компонента, если будут найдены методы удалить его из тория.

Как было показано [3], уран также обладает неотделимой радиоактивностью, крайне похожей на неотделимую активность тория, и какую бы точку зрения ни принять для объяснения одной из них, она, по всей вероятности, будет иметь силу и для другой. Это соображение делает более вероятной вторую гипотезу, что остаточная активность вызвана вторым неториевым типом вещества, образующимся при том же превращении.

XI. Природа излучений тория и ThX

Из изложенного выше взгляда на радиоактивность неизбежно следует, что химические обработки полную радиоактивность тория не изменяют ни по характеру, ни по интенсивности. Было показано, что интенсивность *испущенного* излучения сама по себе не представляет меры активности. Следует также учесть поглощение в массе вещества. Излучение окиси тория испускается из очень плотного порошка, а излучение ThX должно преодолеть лишь очень тонкую пленку материала. Эту трудность можно до некоторой степени обойти, взяв для сравнения тонкую пленку растворенной соли тория, полученную выпариванием раствора досуха на большой металлической пластине. Сравнение таким способом показывает, что радиоактивность ThX после первого разделения почти точно равна активности нитрата, из которого он был получен, тогда как гидроокись сохраняет около $^2/_5$ этой активности. Поэтому общая активность продуктов больше активности исходной соли, но этого и следовало ожидать, так как, несомненно, поглощение в фильтрате больше, чем в продуктах, на которые он разделен.

Подобные трудности мешают ответить и на второй вопрос, влияют ли химические воздействия на природу излучений, так как из опыта известно, что проникающая способность этих излучений уменьшается с толщиной слоя пройденного ими вещества. Однако характерные особенности излучений ThX и тория сравнивались методом проникающей способности. Большое число сравнений подтвердило мысль, что характер радиоактивности тория не изменяется ни химической обработкой, ни отделением ThX, несмотря на то, что различные типы активности неравномерно распределены между разделенными продуктами.

Определение доли отклоняемых в магнитном поле лучей тория и ThX проливает новый свет на этот вопрос. Основной результат сводится к тому, что ThX испускает как отклоняемые, так и неотклоняемые лучи; то же самое относится и к возбужденной активности, вызванной ThX. Но в том опыте, где вследствие удаления ThX по мере его образования возбужденное излучение могло спонтанно распадаться, соединение тория. получившееся после 23 осаждений, оказалось совершенно лишенным отклоняемого излучения. Это — одно из наиболее замечательных сходств между неотклоняемыми радиоактивностями урана и тория, подтверждающее сомнения в том, не состоит ли первичное излучение ThX, подобно излучению UX, целиком из катодных лучей. Однако нет никакого способа решить этот вопрос, так как возбужденное излучение всегда сопровождает первичное излучение ThX и состоит из обоих типов лучей.

Наконец, следует указать, что соотношение между отклоняемыми и неотклоняемыми излучениями различно для разных соединений тория. Нитрат и прокаленная окись — соединения, едва обнаруживающие какую-либо способность выделять эманацию, имеют более высокий процент отклоняемого излучения, нежели соединения с большой способностью

выделять эманацию. Это косвенное подтверждение правильности уже изложенной точки зрения (см. раздел IX), что, если помешать эманации высвободиться, можно увеличить долю возбужденной радиоактивности соединения.

XII. Сводка результатов

Кратко просуммируем приведенные выше результаты. Основная часть радиоактивности тория — обычно около 54% — обусловлена неториевым типом вещества (ThX), обладающим специфическими химическими свойствами; его радиоактивность непостоянна, а активность его спадает вдвое приблизительно за 4 дня. Постоянная радиоактивность тория поддерживается образованием этого вещества с постоянной скоростью. Как скорость образования нового вещества, так и скорость убывания его активности, по-видимому, не зависят от физического и химического состояния системы.

Кроме того, ThX обладает свойством возбуждать радиоактивность на окружающем неактивном веществе, и при обычных условиях около 21% полной активности обусловлены именно этим эффектом. Скорость убывания активности и другие соображения позволяют предположить, что эта активность ничем не отличается от возбужденной радиоактивности, вызванной эманацией тория, которая, в свою очередь, образовалась из ThX. Есть данные, что энергия излучения эманации, если каким-либо способом помешать ей перейти в радиоактивное состояние, увеличит долю возбужденной радиоактивности всего соединения.

Соответствующими средствами можно очистить торий как от ThX, так и от вызванной ThX возбужденной радиоактивности, и тогда торий будет обладать активностью, равной примерно 25% исходной величины, и ниже чего уменьшить ее уже нельзя. Это остаточное излучение целиком состоит из лучей, не отклоняемых магнитным полем, тогда как другие два компонента содержат как отклоняемые, так и неотклоняемые излучения. Весьма вероятно, что эта остаточная активность вызвана вторичным веществом неториевого типа, которое получено при превращении одновременно с ThX и поэтому может быть отделено химическими методами.

XIII. Общие теоретические соображения

Чтобы перейти от экспериментальных результатов к их теоретическому объяснению, сначала необходимо рассмотреть общепринятый взгляд на природу радиоактивности. Твердо установлено, что это свойство — функция атома, а отнюдь не молекулы. Уран и торий, если взять наиболее надежные примеры, обладают этим свойством в любом молекулярном состоянии, а уран обладает им и как элемент. Насколько позволяет заключить сравнение радиоактивности различных соединений разных плотностей и состояния измельчения, интенсивность излучения, по-видимому, зависит только от количества наличного элемента. Она совсем не зависит

ни от источника, из которого извлечен элемент, ни от процесса очистки, которому он подвергался, при условии, что имелось достаточно времени для достижения равновесия. Эти явления нельзя объяснить наличием примесей от радиоактивных веществ, даже если это предположение кажется заманчивым. Так как тогда эти примеси должны присутствовать всегда в одинаковом количестве в различных образцах, полученных из самых разных источников, и, более того, они должны оставаться в *неизменном количестве* после наиболее усовершенствованных процессов очистки. Это нечто противоположное общепринятому смыслу термина примесь.

Все наиболее выдающиеся специалисты считают радиоактивность атомным явлением. Супруги Кюри, основатели химии этой области исследований, опубликовали недавно свои соображения по данному вопросу [9]. Они подчеркивают, что именно эта мысль лежала в основе их работы с самого начала и обусловила их методы исследования. Беккерель, первооткрыватель свойств урана, в своем сообщении о восстановлении активности этого элемента после удаления путем химической обработки активного компонента указывает на значение того факта, что уран испускает катодные лучи. Согласно гипотезам Вильяма Крукса и Дж. Дж. Томсона, эти лучи представляют собой *материальные* частицы с массой, равной $^1/_{1000}$ массы атома водорода.

Следовательно, радиоактивность есть атомное явление, одновременно сопровождаемое химическими изменениями, в результате которых появляются новые типы вещества, причем эти изменения должны протекать внутри атома, а радиоактивные элементы должны испытывать спонтанные превращения. Полученные до сих пор результаты, согласно которым скорость этих реакций не зависит от окружающих условий, доказывают, что рассматриваемые превращения отличаются по своему характеру от тех, с которыми химия имела дело до сих пор. По всей очевидности, мы встретились с явлениями, лежащими за пределами сферы приложения известных атомных сил. Поэтому радиоактивность можно рассматривать как проявление внутриатомного химического превращения.

Радиоактивность привела к познанию превращений, которые, хотя по природе своей они несомненно химические и вещественные, совсем иного порядка величины, чем те, с которыми химия имела дело раньше. Ход образования нового вещества с помощью электрометра можно, пользуясь свойством радиоактивности, распознать в течение немногих часов или даже минут, тогда как для обнаружения этого вещества путем взвешивания потребуется, вероятно, его накопление в течение геологических эпох. Хорошо определенные химические свойства ThX и UX противоречат, однако, той точке зрения, что фактически имеющиеся их количества крайне малы. С другой стороны, существование радиоактивных элементов в земной коре вообще служит априорным аргументом против того, что величина превращений не мала.

Таким образом, радиоактивность как новое свойство вещества, поддающееся точному количественному определению, представляет интерес,

независимо от своеобразных свойств, проявляемых самими излучениями. М. Кюри, выделившая из урановой смолки новое вещество, радий, обладающий специфическими химическими свойствами и спектральными линиями, воспользовалась этим свойством как средством химического анализа. Точная параллель этому может быть найдена в открытии Бунзеном цезия и рубидия с помощью спектроскопии с последующим их выделением.

Представленные результаты показывают, что радиоактивность может быть использована также для наблюдения *за химическими превращениями, происходящими в веществе*. Свойства материи, которые позволяют изучать химические превращения без нарушения реагирующей системы, весьма немногочисленны. В свете полученных результатов, по-видимому, можно надеяться, что радиоактивность, представляющая собой такое свойство, даст средства получения информации о процессах, происходящих внутри химического атома, точно так же, как вращение плоскости поляризации и другие физические свойства используются химией для исследования хода молекулярных превращений.

Мак-Гиллский университет, Монреаль

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rutherford E*. Phil. Mag., 1900, XLIX, 1, 161.
2. *Crookes W*. Proc. Roy. Soc., 1900, LXVI, 409.
3. *Soddy F*. Proc. Chem. Soc., 1902, 121.
4. *Rutherford E*. Phil. Mag., 1899, XLVII, 122.
5. *Rutherford E., Grier A*. Phys. Zs., 1902, 385.
6. *Becquerel A*. Compt. Rend., December 9, 1901, CXXXIII, 977.
7. *Rutherford E*. Phil. Mag., 1900, 10, 181.
8. *Rutherford E*. Phil. Mag., 1900, 161.
9. *Curie, M. Curie P*. Compt. Rend., 1902, CXXXIV, 85.

ПРИЧИНА И ПРИРОДА РАДИОАКТИВНОСТИ *

ЧАСТЬ II

(Совместно с Ф. Содди)

Содержание

I. Введение
II. Метод измерения эманационной способности
III. Деэманация тория и восстановление эманационной способности
IV. Влияние различных условий на выделение эманации
V. Причина выделения эманации торием
VI. Химическая природа эманации
VII. Природа эманационной способности
VIII. Возбужденная радиоактивность тория
XI. Дополнительные теоретические соображения

I. Введение

Исследование радиоактивности тория, подробно описанное в первой части этого сообщения, явилось продолжением изучения присущей соединениям тория способности выделять радиоактивную эманацию. Остается рассмотреть сущность этого свойства и его связь с радиоактивностью тория.

Пожалуй, имеет смысл кратко изложить те основные результаты, которые были известны к моменту начала этой работы. Радиоактивность тория была открыта в 1898 г. Шмидтом и Кюри независимо, а в следующем году Оуэнс подробно исследовал ее природу [1]. Он наблюдал непостоянство излучения и уменьшение его величины под действием воздушного потока. Вскоре после этого последовало открытие эманации тория [2], объясняющее эти результаты, и ее способности возбуждать активность на окружающем веществе.

Было показано, что излучение эманации быстро убывает со временем с совершенно определенной скоростью, падая через минуту приблизительно вдвое. Эманация проходит, не изменяясь, через вату, через слабую и неразбавленную серную кислоту, через алюминий и другие металлы в виде фольги, но не проходит даже через очень тонкий листок слюды. Способность тория выделять эманацию не зависит от окружающей атмосферы, но в сильной степени разрушается интенсивным прокаливанием, после чего не восстанавливается со временем.

---

* Philosophical Magazine, November, 1902, ser. 6, 4, 569—585.

Существует очень тесная связь между возбужденной радиоактивностью, созданной соединениями тория, и эманацией. Было доказано, что количество первой, образованное при разных условиях, пропорционально количеству последней, и если способность тория выделять эманацию была разрушена прокаливанием, то соответственно исчезала и его способность наводить радиоактивность. Одновременно с появлением статей по этому вопросу Кюри показали, что радий также обладает способностью возбуждать активность на окружающих предметах. Позднее Дорн [3] повторил упомянутую работу по торию и расширил ее, исследовав также два образца радиоактивного соединения бария (радий), приготовленных де Хаеном, и образец радиоактивного висмута (полоний). Дорн обнаружил, что радий, в отличие от полония, выделяет эманацию, особенно при нагревании, и она обладает способностью возбуждать активность на окружающих предметах. Радий и торий в этом отношении совершенно аналогичны и отличаются этим от других радиоактивных веществ, но явления, происходящие в обоих случаях, весьма различны. Эманация радия сохраняет свою интенсивность в течение многих недель, тогда как вызванная ею возбужденная радиоактивность исчезает гораздо быстрее, чем возбужденная радиоактивность тория.

Одного из наиболее интересных результатов в этой области достигли в ходе своей работы Эльстер и Гейтель [4], обнаружившие возможность получения возбужденной радиоактивности в атмосфере без добавочного агента, для чего просто на воздух выставлялась на много часов проволока, заряженная до высокого отрицательного потенциала; эта проволока обладала полученным свойством и после растворения в кислотах и последующего выпаривания. Но и в этом случае скорость исчезновения активности отличается от скорости убывания возбужденной радиоактивности, созданной торием.

В начале работы наиболее вероятным казалось предположение, что эманационная способность — это отдельное явление, непосредственно не связанное с обычной радиоактивностью тория. Способность окиси тория выделять эманацию может быть разрушена прокаливанием, но уменьшения активности тория при этом не происходит. Позднее было обнаружено влияние различных внешних условий на величину эманационной способности, не затрагивающих, однако, радиоактивности. С этой точки зрения природа явлений была обстоятельно изучена, но полученные результаты были крайне противоречивы, и при этом пришли к выводу, что эманационная способность, вероятно, есть проявление некоторых превращений типа химических реакций.

Однако открытие ThX и его непрерывного образования подсказало верное толкование результатов и привело к их достаточно полному объяснению.

II. Метод измерения эманационной способности

Эманация тория (и радия) во всех отношениях ведет себя подобно временно радиоактивному газу и быстро диффундирует через пористые материалы, например, через толстый картон, совершенно непрозрачный для прямолинейного излучения. Каждая частица эманации ведет себя так, будто она является излучающим центром, создающим в окружающем ее объеме газа заряженные носители. Эманация проходит через ватные пробки, ее можно продуть также через жидкость без заметной потери радиоактивности, тогда как заряженные носители, созданные эманацией, и прямолинейно распространяющееся радиоактивное излучение полностью

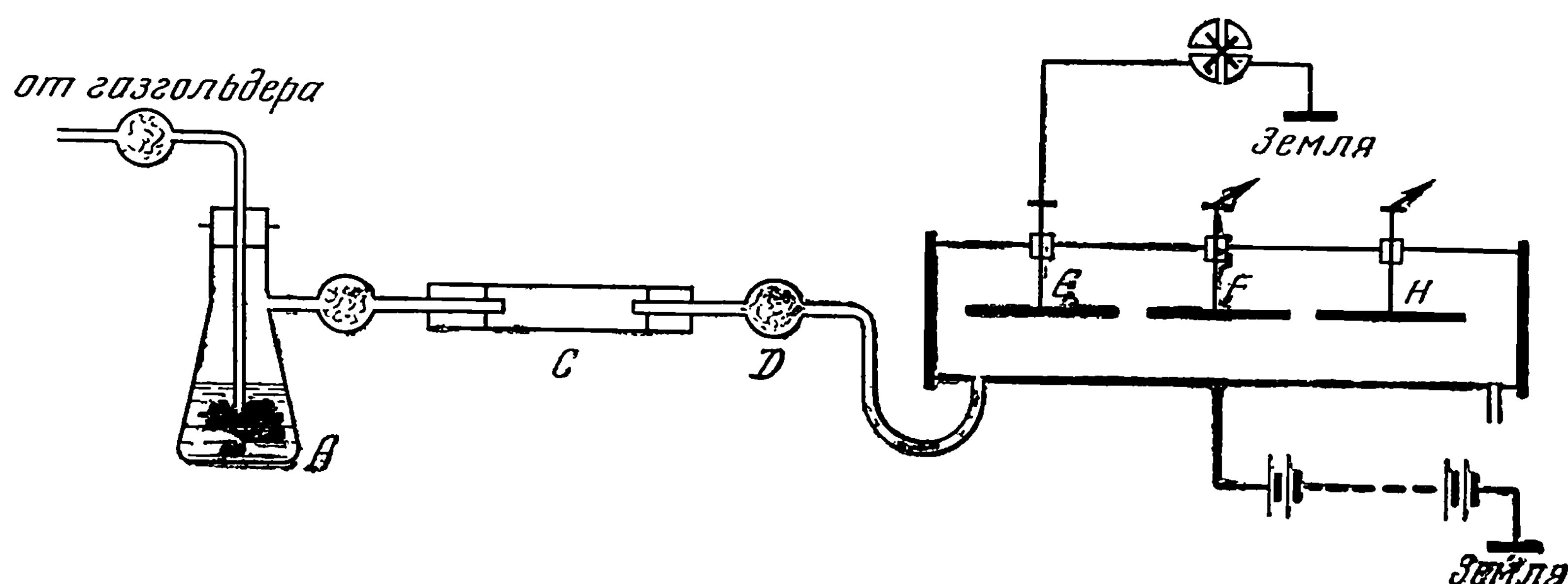


Рис. 1

поглощаются при прохождении через ватную пробку, стеклянную вату или через жидкость. Тем самым напрашиваются способы исключения действия прямолинейно распространяющегося излучения и измерения количества одной только эманации. Воздух, прошедший над ураном или другим радиоактивным веществом, не выделяющим эманацию, пройдя через ватную пробку, перестает быть проводником тока. Однако аналогичный опыт с торием показал, что проводимость сохраняется и служит мерой количества присутствующей эманации.

На рис. 1 показана схема эксперимента, где сравнивалась эманационная способность разных веществ. Эти вещества в виде тонкого порошка помещались в мелком свинцовом сосуде внутри стеклянного цилиндра *C* длиной 17 *см* и диаметром 3,25 *см*, снабженного резиновыми пробками. Поток воздуха из большого баллона, пройдя по наполненной ватой трубе, где он очищался от частиц пыли, продувался через серную кислоту в сосуде *A*. Затем он проходил через баллон, туго набитый ватой, где освобождался от следов влаги. Смесь эманации и воздуха проходила из цилиндра *C* через ватную пробку *D*, которая полностью удаляла все заряженные носители, захваченные эманацией. Затем эманация поступала в длинный латунный цилиндр длиной 75 *см* и диаметром 6 *см*. Цилиндр, изолированный парафиновыми блоками, был соединен с одним полюсом батареи небольших свинцовых аккумуляторов, второй полюс которой был заземлен

лен. Вдоль оси цилиндра были помещены три электрода *E*, *F*, *H* равной длины. Ток в газе измерялся электрометром Кельвина системы Уайта. Электрометр и соединения были соответствующим образом заэкранированы с помощью заземленной проволочной сетки. Переключатель был устроен так, что любой из электродов *E*, *F*, *H* или все вместе можно было быстро соединить с одной парой квадрантов электрометра, вторая пара которых была всегда заземлена. Измерения выполнялись, как обычно, по наблюдению скорости движения стрелки электрометра после подсоединения одной пары квадрантов к электродам. После того как выделяющее эманацию вещество помещалось в цилиндр *C* и в течение нескольких минут там поддерживалась постоянная скорость потока воздуха, ток в газе, обусловленный эманацией, достигал установившегося значения. За меру этого тока можно принять число делений шкалы, пройденных стрелкой за 1 *сек*.

В таком приборе эманация, испущенная 10 *г* обычной окиси тория, создает между тремя соединенными вместе электродами и цилиндром ток, равный $3{,}3 \cdot 10^{-11}$ *а*. При работе с электрометром средней чувствительности это соответствует отклонению на 100 делений за 12 *сек*, так что легко можно измерить $^1/_{100}$ часть этого тока, т. е. заметить действие эманации, созданной 0,1 *г* окиси тория. В 100 раз более чувствительный электрометр не мог обнаружить присутствия эманации или радиоактивности в окислах олова, циркония, титана и других элементах той же группы периодической таблицы.

Скорость убывания излучения эманации. Чтобы сравнить «скорости распада» излучений от эманации различных веществ, использовались все три электрода *E*, *F*, *H*. В цитированных выше работах было показано, что излучающая способность эманации тория снижается вдвое приблизительно в течение 1 *мин*. Вследствие этого ток через электрод *E* больше, чем ток через электрод *H*. Если известна скорость воздуха вдоль цилиндра и соответствующие токи через электроды *E*, *F* и *H*, можно легко подсчитать скорость убывания излучения. Однако если нам нужно просто сравнить скорости распада одной эманации и другой, то надо только сравнить отношение токов через электроды *E*, *F*, *H* в каждом случае, поддерживая постоянным поток воздуха. Если отношение токов не меняется со временем, мы можем заключить, что излучающая способность обоих веществ уменьшается с одинаковой скоростью. Таким образом, сравнение эманаций можно проводить и качественно, и количественно. В большинстве опытов ток через электрод *E* был почти в 2 раза больше, чем через электрод *H*; скорость воздуха вдоль цилиндра составляла около 0,8 *см/сек*.

Сравнение эманационной способности. Опыты по определению количества эманации разных веществ во всех случаях носят относительный характер. Эталоном для сравнения обычно был образец тория весом 10 *г*, полученный от изготовителя. Он выделял количество эманации, удобное для измерения. Были проведены предварительные опыты с целью установления связи между весом тория и количеством эманации, которая

выделяется в цилиндре. Ниже показано, что количество эманации прямо пропорционально весу вещества в пределах точности измерений:

Вес тория, *г*	2	4	10	20
Деления шкалы в 1 *сек*	1,41	2,43	6,33	13,2

Поправка на естественную утечку. Даже без выделяющего эманацию вещества в цилиндре стрелка электрометра медленно движется после разведения квадрантов. Это вызвано незначительным током, возникающим, главным образом, за счет утечки вследствие проводимости по эбониту, а также тока, созданного наведенной радиоактивностью, накопленной на отрицательном электроде в ходе опытов этого дня. Ток утечки изменяется день ото дня и, как правило, незначителен, но при работе с образцами, обладающими очень малой способностью выделять эманацию, необходимо вносить на него поправку. Число делений шкалы, пройденное стрелкой электрометра в 1 *сек* в отсутствие вещества, выделяющего эманацию, вычиталось из числа, полученного при наличии испытуемого образца. Полученное таким образом число делений шкалы в 1 *сек* показывает ток, обусловленный одной эманацией.

Второй метод сравнения эманационной способности. Прибор для сравнения излучения (см. рис. 1), описанный в первой статье [1], можно с успехом использовать для сравнения эманационной способности. В этом случае толстый слой тория (несколько граммов) распределяется по пластине и покрывается двумя листами обыкновенной бумаги. Как мы убедились, она почти полностью задерживает прямолинейно распространяющееся излучение, тогда как эманация проходит через нее беспрепятственно. В этом случае ток измеряется по достижении установившегося состояния, обусловленного накапливанием эманации. Это требует некоторого времени и мер предосторожности против возникновения тяги воздуха. По этой причине этот способ менее удобен, чем описанный выше, но полученные обоими методами результаты почти точно совпадают. Так, образец «деэманированного» тория, обладающий по первому методу 12% эманационной способности эталонного образца, по второму методу обладает 13%, а образец окиси, приготовленный из щавелево-кислого тория, обладает соответственно 37 и 39% при измерении обоими методами. Близкое совпадение значений, полученных совершенно различными по характеру методами, служит доказательством того, что полученные результаты заслуживают большой степени доверия.

III. Деэманация тория и восстановление эманационной способности

Как было установлено, способность тория выделять эманацию разрушается длительным интенсивным нагреванием. Более тщательное изучение этого процесса — есть первый шаг изучения всего явления.

[1] Настоящий том, стр. 202.

В предыдущих опытах не удалось полностью деэманировать торий, хотя было достигнуто снижение выделения эманации приблизительно до 15% его первоначальной величины. Один из таких образцов хранится уже в течение двух лет и не изменил этого значения. Был проведен опыт, в котором торий нагревался в течение часа в мощной бензиновой печи до наивысшей температуры, при которой еще можно безопасно пользоваться платиновыми тиглями. Температура была столь высокой, что плавились стенки из огнеупорной глины, а белая глина подставки проявила признаки размягчения. Как оказалось, образец сохранил около 8% своей начальной способности выделять эманацию. В другом опыте маленький платиновый тигель, наполненный торием, нагревали в течение получаса в малой печи с помощью большой паяльной лампы и пары мощных ручных мехов. Асбестовое волокно на внешней стенке тигля полностью расплавилось; температура, вероятно, была лишь немного ниже, чем в предыдущем опыте. Этот образец также сохранил около 8% своей способности выделять эманацию. Никаких дальнейших попыток полного разрушения эманационной способности не предпринималось.

Небольшое количество тория нагревалось в платиновом тигле на открытом воздухе паяльной лампой обычных размеров и ручными мехами в течение 5 *мин*, после чего сохранилось около 45% всей эманационной способности. Измерялось также влияние времени нагрева, для чего в платиновом тигле над обычной бунзеновской горелкой в течение различных периодов нагревались приблизительно равные количества тория

Время нагрева	10 *мин*	1 *час*	24 *час*
Эманационная способность, %	61	59	42

Таким образом, существует, по-видимому, большое и практически внезапное снижение эманационной способности при любой температуре выше красного каления, за которым следует постепенное ее снижение со временем, в течение которого поддерживается эта температура. Так, нагрев в течение 5 *мин* паяльной лампой хотя и был более эффективен, чем нагрев в течение такого же времени при температуре бунзеновской горелки, зато был гораздо менее эффективен, чем нагрев горелкой в течение 24 *час*.

Влияние влаги. Следующим вопросом, подлежащим изучению, был вопрос о том, нельзя ли потерю способности выделять эманацию отнести за счет потери воды и высушивания тория при прокаливании. Образец деэманированного тория (сохранивший около 14% начальной способности) был помещен в середину трубки из иенского стекла, один конец которой был закрыт и наполнен водой, а второй конец оттянут на конус. Трубка в наклонном положении помещалась в мощной трубчатой печи, и та ее часть, где был расположен торий, подогревалась до возможно более высокой температуры. В это время от налитой в трубку воды над торием проходил медленный поток пара, улетучивающийся через конический конец. Когда вся вода испарилась, конус был заварен, и трубку оставили

охлаждаться в атмосфере пара без доступа воздуха. При испытании оказалось, что способность тория выделять эманацию снизилась приблизительно до 7%. Таким образом, нагревание снижает эманационную способность, а пар совсем не восстанавливает ее.

В следующем опыте мы попробовали сделать по-другому. С обычным торием, обладающим нормальной способностью выделять эманацию, были параллельно проведены две аналогичные операции. В первом опыте торий нагревался в фарфоровой трубке в трубчатой печи в течение 3 *час*, и за это время над ним пропустили около 500 *см*^{3} воды. Во втором опыте образец тория нагревался точно таким же образом в течение такого же времени, только пар заменили потоком хорошо осушенного воздуха. Результат оказался убедительным: оба образца совершенно одинаково снизили свою способность выделять эманацию примерно на 50% от исходной.

Эти опыты доказывают, что водяной пар не оказывает никакого влияния ни на деэманацию тория, ни на восстановление утраченной им способности выделять эманацию.

Восстановление эманационной способности химическими способами. Было предпринято специальное исследование, чтобы проверить, не восстановит ли деэманированный торий после ряда химических реакций свою утраченную способность выделять эманацию.

Упомянем сперва, что после прокаливания торий весьма существенно изменил свои химические и физические свойства. Чисто белый цвет при температурах, соответствующих первым стадиям деэманации, переходит в коричневатый, а после воздействия очень высокой температуры — в чисто розовый. В то же время растворимость вещества в серной кислоте значительно уменьшается. Во всех случаях некоторую его часть даже после длительного и повторного кипячения в концентрированной кислоте никак не удается растворить, хотя эта часть после каждой последующей обработки уменьшается, по-видимому, она ничем не отличается от остального вещества. Однако никакой разницы в быстроте, с которой его разъедает хлор при тщательном перемешивании с углем, не наблюдалось. Образование хлористой соли этим способом — наиболее легкий путь растворения прокаленного тория.

Предварительные опыты показали, что способность выделять эманацию зависит не только от природы химического соединения, но, и очень существенно, от предыстории одного и того же соединения. Так, окись, полученная из щавелево-кислой соли, обычно не обладает такой большой способностью выделять эманацию, как окись, используемая в качестве эталона. Поэтому были сделаны два параллельных опыта — один с обычным, а второй с деэманированным торием, обладавшим 9—10% эманационной способности первого. Оба были превращены в хлористые соли обычным способом — путем перемешивания с раствором сахара, обугливания и прокаливания полученной при этом смеси окиси и угля в потоке сухого хлора. Потом каждый образец был обработан водой, торий осаж-

ден и высушен при 110°. Результат оказался убедительным, так как оба образца приобрели одну и ту же эманационную способность. В первые несколько дней ее величина быстро росла, и через две недели оба образца обладали эманационной способностью, равной 260% эманационной способности тория, применяемого в качестве эталона.

Таким образом, процесс деэманации прокаливанием не уничтожает необратимо способность выделять эманацию, так как после растворения и повторного осаждения нет никакой разницы в способности обыкновенного и деэманированного тория. Вывод из этих опытов ясен: прокаливание не устраняет причину выделения эманации, а только заставляет ее бездействовать некоторое время.

IV. Влияние различных условий на выделение эманации

Описанные опыты поставили два новых вопроса. Гидроокись тория обладала способностью выделять эманацию, которая после приготовления возрастала со временем, а по достижении максимума оказывалась значительно больше эманационной способности окиси. Прежде чем проводить какие-либо дальнейшие исследования, необходимо было тщательно изучить влияние различных условий на способность соединений тория выделять эманацию.

Влияние температуры. Влияние повышения температуры на эманационную способность уже было тщательно исследовано одним из нас [5]. Эти результаты показали, что при повышении температуры до известного предела вблизи температуры красного каления соответственно увеличивается и способность выделять эманацию. При этом в максимуме она в 3—4 раза больше, чем при обычной температуре, и сохраняет это увеличенное значение в течение нескольких часов без каких-либо признаков уменьшения. После охлаждения тория его способность выделять эманацию возвращается к значению, близкому к нормальной величине. Однако при превышении этого температурного предела начинается деэманация, и даже при поддержании высокой температуры эманационная способность быстро падает ниже ее первоначального значения. После охлаждения вещество оказывается более или менее деэманированным. Интересно, что если деэманация начинается, то никакого увеличения эманационной способности уже не наблюдается.

Эти опыты были продолжены для изучения влияния охлаждения. Платиновую трубку, содержащую торий, окружили войлочным чехлом со смесью твердой углекислоты и эфира. Эманационная способность немедленно упала до 10% прежнего значения. После удаления охлаждающего агента она снова быстро возросла до значения, близкого к нормальному.

В другом опыте некоторое количество тория в платиновом тигле окружили смесью твердой углекислоты и эфира и выдерживали в вакууме в течение нескольких часов. После того как образец был вынесен на воздух и был нагрет, он получил почти такую же способность выделять эмана-

цию, как обычно, а после некоторой выдержки на воздухе снова был испытан, и тогда между ним и эталоном нельзя было обнаружить никакой разницы.

Таким образом, изменения температуры тотчас же приводят к значительным изменениям эманационной способности, но в пределах от —110° до температуры красного каления никакого постоянного изменения ее величины не происходит.

Влияние влажности. Дорн [3] заметил, что влажность воздуха вызывает небольшое возрастание способности тория выделять эманацию и возбуждать радиоактивность на окружающих предметах. Мы подтвердили и расширили его результаты следующими опытами.

Два одинаковых образца тория, оставленные на неделю герметически закупоренными, один в сухой атмосфере, а второй в воздухе, насыщенном водяными парами, показали соответственно возрастание и уменьшение эманационной способности. Влажный образец обладал почти вдвое большей эманационной способностью, чем сухой. Более полное высушивание выдерживанием образцов в вакууме с фосфорным ангидридом в течение месяца не приводит к дальнейшему снижению эманационной способности. Смешивание тория с концентрированной серной кислотой при энергичном встряхивании примерно вдвое уменьшает выделение эманации. Эти опыты показывают, что присутствие воды, хотя и вызывает заметное увеличение эффекта, все же играет второстепенную роль.

Был поставлен еще ряд опытов по изучению влияния света и воздуха на эманационную способность. Наиболее полезный, полученный при этом результат состоит в том, что способность тория выделять эманацию не зависит от различных внешних условий, пока он содержится в закрытом сосуде, а когда его переносят на воздух, то эта способность меняется в сравнительно узких пределах.

Гидроокись тория. Способность этого соединения выделять эманацию, подобно окиси, возрастает при воздействии водяного пара. Опыт, аналогичный только что описанному для окиси, показал, что способность сухого образца выделять эманацию составила 400% а способность влажного образца 300% по сравнению с обычным торием. Кратковременная экспозиция на воздухе снова выровняла оба эти значения. Двуокись углерода, которую гидроокись поглощает из воздуха в размере до 2% от своего веса, не влияет на способность выделять эманацию.

Влияние молекулярных условий и агрегатного состояния тория на его эманационную способность. В отличие от радиоактивности способность соединений тория выделять эманацию совсем не зависит от наличного количества тория. Это положение иллюстрируют действие температуры на деэманированный торий и высокое значение эманационной способности гидроокиси тория. Сернокислый, щавелево-кислый и азотно-кислый торий обладают очень малой способностью выделять эманацию, тогда как карбонат тория обладает такой способностью, в 5 раз превышающей способность тория. Вообще, плотное кристаллическое соединение в виде порош-

ка не очень тонкого помола обладает гораздо более высокой способностью выделять эманацию, нежели рыхлое вещество типа пудры значительно более тонкого помола.

Оказалось, однако, что растворение сильно увеличивает способность растворимых солей тория выделять эманацию. Тщательное определение показало, что для 20 *г* тонко размолотого нитрата тория способность выделять эманацию составляла всего 1,8% по сравнению со способностью тория. Однако этот же образец, растворенный в воде, при испытании на эманацию продуванием воздуха через раствор дает приблизительно в 3 раза больше эманации, чем окись тория. Иначе говоря, растворение в воде повышает способность нитрата тория выделять эманацию почти в 200 раз. Способность раствора выделять эманацию, как и способность твердых тел, пропорциональна весу вещества, и в проверенных пределах степень разведения не сильно сказывается на ее значении, так как раствор 10 *г*, имеющий объем 25 *см*^{3}, обладает такой же способностью выделять эманацию и после разведения в 4 раза.

V. Причина выделения эманации торием

Отделение ThX от тория, подробно описанное в первой части этого сообщения, показало, что не только радиоактивность, но и способность тория выделять эманацию связаны с присутствием ThX — вещества, отличного от тория. Выпаренные растворы, из которых аммиаком осаждалась гидроокись тория, почти не изменяли величины эманационной способности, тогда как осажденная гидроокись была более или менее деэманированной. По прошествии некоторого времени способность фильтратов выделять эманацию пропадала, тогда как способность гидроокиси в большинстве случаев неизменно росла со временем, пока в конце второй недели не достигала максимума, превышающего в 3 или 4 раза способность обычного тория выделять эманацию. Это восстановление способности гидроокиси выделять эманацию было замечено задолго до того, как было обнаружено аналогичное изменение ее радиоактивности; оба явления объясняются одинаковым образом. Если при осаждении аммиаком полностью удалить ThX, то гидроокись тория вначале почти совсем не выделяет эманации. Небольшая оставшаяся часть этой способности (только несколько процентов от максимального значения) может быть объяснена восстановлением ThX за время высыхания осадка.

Скорость восстановления и убывания эманационной способности. Скорость убывания способности ThX выделять эманацию и восстановление этого свойства торием, из которого был выделен ThX, были исследованы параллельно с уже описанными аналогичными опытами по радиоактивности. Была взята одна четверть выпаренного фильтрата, использованного для опытов по радиоактивности, и измерялось снижение со временем ее способности выделять эманацию. Измерялось также увеличение эманационной способности гидроокиси тория, из которого выделяли ThX.

Результаты опыта показаны на рис. 2. Кривая распада измерена только приблизительно, так как трудно без специальной установки, обеспечивающей постоянство воздушного потока и перемешивания раствора, точно измерить способность жидкости выделять эманацию.

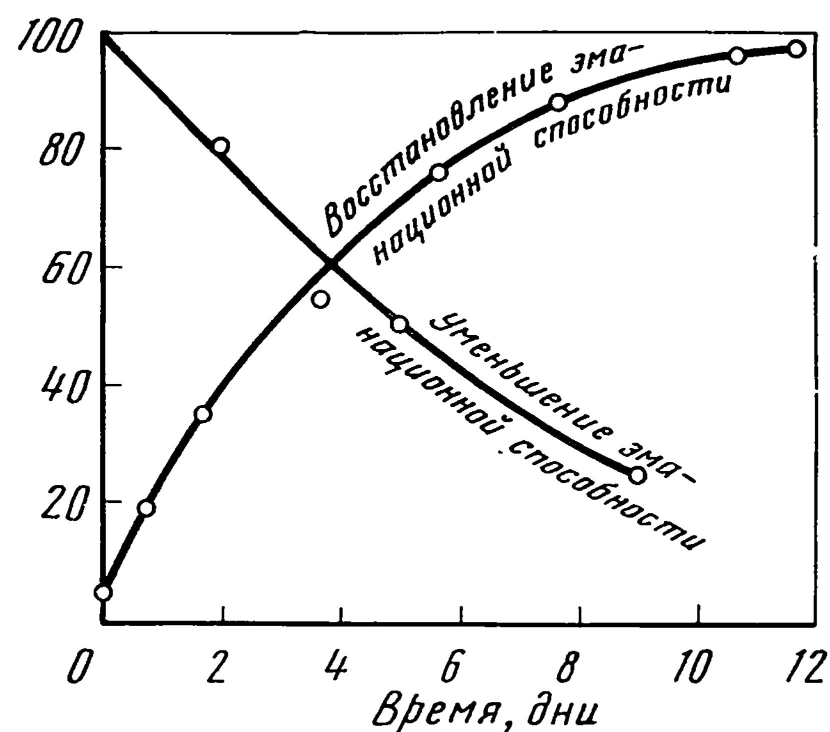


Рис. 2

Хотя эти опыты носят лишь предварительный характер, они подтверждают заключение, что эманационная способность убывает и восстанавливается по тому же закону и с той же скоростью, что и радиоактивность ThX, и что поэтому является одним из свойств последнего, а не тория. Кривая распада, насколько ей можно доверять, показывает, что способность ThX выделять эманацию в каждый момент времени пропорциональна его радиоактивности.

VI. Химическая природа эманации

В следующей работе вопрос идет о самой эманации, а не о создающем ее веществе. Работа была предпринята, чтобы выяснить, не обладает ли эманация химическими свойствами, на основании которых можно было бы установить ее идентичность с каким-либо известным веществом. Уже в первых опытах по эманации обнаружилось, что она проходит через концентрированную серную кислоту, не изменяясь. Это же остается верным для всех исследованных реагентов.

Вначале мы проверили влияние температуры. Смесь воздуха и эманации, полученную обычным способом при прохождении воздушного потока над торием, пропускали через платиновую трубку, нагретую электричеством до возможно более высокой температуры, а также через трубу, охлажденную твердой углекислотой и эфиром. Затем труба была наполнена платиновой чернью, и эманация проходила через нее при пониженной температуре и при постепенном повышении температуры до предела. Заметим, что воздействие интенсивного нагрева должно было превратить платиновую чернь в губчатую платину. В другом опыте эманация проходила через слой докрасна нагретого хромата свинца в стеклянной трубке. Затем поток воздуха был заменен потоком водорода и эманацию пропускали через нагретые докрасна порошок магния и палладиевую чернь, а с применением потока двуокиси углерода — и через нагретую докрасна цинковую пыль. Во всех случаях количество эманации заметно не изменилось. Если оно и менялось, то только незначительно возрастало за счет того, что время, необходимое для прохождения через трубы горячего потока

газа, несколько меньше, чем холодного, поэтому соответственно меньше и убывание эманации в пути. Заметим, что единственные газы из известных в настоящее время, способные проходить через все примененные реагенты, принадлежат к недавно открытому семейству аргона.

Но эти же результаты можно объяснить и по-другому. Если бы эманация была проявлением возбужденной радиоактивности в окружающей атмосфере, то полученный результат можно было бы объяснить тем, что по характеру самих опытов в каждом случае пришлось использовать в качестве среды, через которую проходила эманация, газ, не реагирующий с примененным реагентом. Нагретый докрасна магний не может удержать эманацию, состоящую из радиоактивного водорода, а нагретая докрасна цинковая пыль — эманацию, состоящую из двуокиси углерода. Правильность этих объяснений была проверена следующим образом. Двуокись углерода была пропущена над торием, затем через Т-образную трубку, в которой она перемешивалась с потоком воздуха, после чего смесь поступала в испытательный цилиндр. Но между ним и Т-образной трубкой была введена большая трубка с известью, гашеной раствором едкого натра, в которой поток газа, прежде чем попасть в испытательный цилиндр, освобождался от двуокиси углерода. Оказалось, что количество эманации совершенно не меняется, независимо от того, проходила ли описанным способом двуокись углерода над торием или при неизменных остальных условиях была заменена потоком воздуха той же скорости. Таким образом, предположение, что эманация представляет собой воздействие возбужденной радиоактивности на окружающую среду, исключается. Это *a priori* невероятно из-за очень разных скоростей спада активности в обоих случаях. Поэтому описанные опыты следует объяснять тем, что эманация — это химически инертный газ, по своей природе подобный газам из семейства аргона.

В свете этих результатов и развитой точки зрения на природу радиоактивности естественно возникает предположение, нельзя ли связать с радиоактивностью присутствие гелия в минералах и его неизменную связь с ураном и торием.

VII. Природа эманационной способности

Следовательно, предыдущие результаты находят свое простейшее объяснение с той точки зрения, что, подобно тому как химические превращения, протекающие в тории, образуют вещество, отличное от него, точно так же это вещество участвует в дальнейшей реакции, порождая газообразное вещество, радиоактивное состояние которого и есть эманация.

Легко видеть, что это вторичное превращение отличается от первичного, так как на него явным образом влияют окружающие условия. Доказано, что на величину эманационной способности влияют влажность, агрегатное состояние и температура. При изменении температуры от —80° до

температуры красного каления способность окиси тория выделять эманацию монотонно возрастает в 40 раз, а отношение значений способности нитрата тория в твердом состоянии и в растворе выделять эманацию равно 1 : 200. Поэтому с первого взгляда кажется, что вторичное превращение больше похоже на обыкновенную химическую реакцию, чем первичное. Однако нельзя забывать, что законы, управляющие этими двумя явлениями — радиоактивностью и эманационной способностью, — неизбежно очень различны. В первом явлении мы имеем дело с интенсивностью излучений, испускаемых твердым телом, во втором — со скоростью выделения газа в окружающую атмосферу либо из твердого тела, либо из жидкости. Поскольку этот газ обнаруживается по его радиоактивности, а она чрезвычайно быстро убывает со временем, то самое незначительное уменьшение скорости его выделения будет очень заметно влиять на полученное из опыта значение эманационной способности.

Теперь вполне установлено опытом, что соединения тория, химически деэманированные путем удаления ThX, иногда не восстанавливают со временем своей нормальной способности выделять эманацию, а сохраняют ее низкое значение. В одном из опытов был приготовлен карбонат тория, почти не обладавший способностью выделять эманацию до тех пор, пока его снова не растворили и не выделили в осадок. В другом опыте на двух образцах гидроокиси, приготовленных из разных нитратов, проверялось возрастание способности выделять эманацию со временем. В одном образце она нормально повышалась до максимума, который был в 20 раз больше минимального значения. В другом образце эта способность минимального значения, равного минимальному значению первого образца, повысилась до максимума своего значения, равного только $^1/_4$ максимального значения первого образца. Когда опыт повторили в тех же условиях, но с применением одного и того же нитрата, способность гидроокиси выделять эманацию была обычной. Таким образом, выделению эманации в радиоактивном состоянии, по-видимому, в некоторых случаях можно почти полностью помешать, а в других частично, хотя при этом нет никаких особенных изменений физического состояния и другие образцы, приготовленные таким же способом, ведут себя обычно.

Вот те спорные вопросы, которые остается объяснить. В настоящее время нельзя решить, чем вызываются эти изменения способности выделять эманацию — изменением скорости реакции, образующей эманацию, или тем, что изменяется время, за которое эманация выделяется. Подробно описанные в первой статье опыты по возрастанию доли возбужденной активности в деэманированных прокаливанием соединениях, по-видимому, подтверждают ту точку зрения, что превращение продолжается, но эманации не удается выделиться. Опыт по изменению эманационной способности с температурой одинаково хорошо объясняется любой гипотезой.

VIII. Возбужденная радиоактивность тория

Поскольку эманация вызывает возбужденную радиоактивность, а последняя, по-видимому, возникает под действием сильно активного вещества, выпадающего в осадок, то следует предположить, что имеет место третичное превращение. Эманация, газообразный продукт вторичной реакции, в свою очередь, превращается в продукт третьей реакции, вызывающий возбужденную активность. Тот факт, что этот продукт в электрическом поле полностью проявляется на отрицательном электроде, указывает, что он переносится положительным ионом. Не входя в этой статье в дальнейшее рассмотрение возбужденной радиоактивности, можно лишь указать, что происходящие в атоме тория последовательные превращения еще не кончаются на этой стадии. Вспомним, что возбужденное излучение частично состоит из катодных лучей. Далее, интенсивность возбужденной активности с момента ее образования сначала *возрастает* точно так же, как в случае ThX, только что отделенного от тория, когда этот рост преобладает над эффектом нормального распада. Возбужденная активность радия ведет себя до некоторой степени аналогичным образом. В этом случае вещество, вызывающее возбужденную активность, по-видимому, не однородно и ведет себя по отношению к кислотам и т. д. как состоящее из двух различных соединений [6].

IX. Дополнительные теоретические соображения

Было проведено достаточно данных, чтобы ясно показать, что как в радиоактивности тория, так и радия, проявляются сложнейшие превращения, каждое из которых сопровождается непрерывным образованием особого вида активного вещества. Сложность явления приводит к важному вопросу об основных взаимоотношениях между происходящими превращениями и радиоактивностью. До сих пор в качестве простейшего объяснения предполагалось, что радиоактивность предшествует химическому превращению, и поэтому его продукты обладают известным количеством имевшейся вначале энергии, рассеиваемой с течением времени. Несколько иное объяснение, хотя бы только в порядке рассмотрения с некоторых точек зрения кажется более предпочтительным. Радиоактивность может сопровождать превращение, причем в любой момент времени ее количество пропорционально последнему. С этой точки зрения неотделимые активности тория и урана вызываются первичным превращением, в котором образуются ThX и UX. Активность ThX вызывается вторичным превращением, создающим эманацию, активность эманации — третичным превращением, в котором образуется вещество, вызывающее возбужденную активность, причем активность последнего создается в ходе дальнейшего превращения. В таком случае закон убывания активности со временем [см. уравнение (1) в первой части, стр. 211] во всех случаях, кроме первичного превращения, выступает просто как выражение простого за-

кона химического превращения, по которому вещество изменяется со скоростью, пропорциональной оставшемуся количеству. В первичном превращении оставшееся количество бесконечно велико по сравнению с количеством, изменившимся за короткое время, и поэтому скорость реакции постоянна. Эта точка зрения, несомненно, объясняет, почему эманационная способность ThX пропорциональна радиоактивности. Пока последняя считается следствием происходящего превращения, причин для этой пропорциональности нет. Но если считать, что она сопровождает превращение, в котором образуется эманация, то результат вытекает естественно. Поэтому требуются дополнительные и более точные определения скорости возрастания и уменьшения эманационной способности.

По-видимому, в случае урана эти превращения, сопровождаемые радиоактивностью, приводят к тому продукту, который вызывает активность UX. Интересно, что это вещество испускает только катодные лучи и продолжает испускать их в течение многих недель после его отделения от урана. Это ставит такой вопрос: нельзя ли установить какую-либо связь между природой излучения и видом превращения, которое оно вызывает?

Единственное соображение, противоречащее этой точке зрения, представляет собой существование полония. Излучения этого вещества весьма похожи на неотделимую радиоактивность урана как по способности выделять эманацию, так и по отсутствию отклоняемых лучей. Но все попытки отделить полоний от урана до сих пор были тщетными, и, пока это не сделано, его существование само по себе не влияет на решение настоящего вопроса.

Наиболее удовлетворительное объяснение остаточной активности урана и тория и связи между эманационной способностью и радиоактивностью ThX возникает, по-видимому, на основе этой модифицированной точки зрения. Однако, прежде чем связь между радиоактивностью и химическими превращениями можно будет считать точно установленной, предстоит большая работа как по выяснению вопроса о связи эманационной способности и радиоактивности, так и по выяснению природы полония.

Мак-Гиллский университет, Монреаль

ЛИТЕРАТУРА

1. *Owens R. B.* Phil. Mag., 1899, 360.
2. *Rutherford E.* Phil. Mag., 1900, 1, 161.
3. *Dorn.* Abk. Naturforsch. Ges. für Halle-a-S., 1900.
4. *Elster, Geitel.* Phys. Zs., 1901, II, 590.
5. *Rutherford E.* Phys. Zs., 1901, II, 429.
6. *Rutherford E.* Phys. Zs., 1902, 254.

ВОЗБУЖДЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ И ИОНИЗАЦИЯ АТМОСФЕРЫ *

(Совместно с С. Дж. Алленом)

В опытах, проведенных Эльстером и Гейтелем [1], а также Ч. Т. Р. Вильсоном [2], показано, что помещенный в закрытый сосуд хорошо изолированный заряженный проводник постепенно теряет заряд. Это явление объясняется небольшой спонтанной ионизацией воздуха, находящегося внутри закрытого сосуда. Основываясь на опытных данных, Вильсон рассчитал, что в 1 *см*^{3} воздуха за 1 *сек* образуется около 19 ионов. В более поздней статье [3] Вильсон показал, что ионизация в различных газах приблизительно пропорциональна плотности и давлению газа. В его выводах указывается, что наблюдаемая в газах ионизация может быть вызвана, по крайней мере частично, ионизующим излучением, испускаемым стенками сосуда.

Эльстер и Гейтель [4] недавно сделали интересное открытие, что отрицательно заряженный проводник, помещенный на открытом воздухе, становится временно радиоактивным. Через несколько часов эта радиоактивность распадается. Явление это очень напоминает «возбужденную» радиоактивность, вызываемую радиоактивными эманациями тория и радия. Радиоактивность, возбужденная воздухом, может быть сконцентрирована на отрицательном электроде точно так же, как активность, возбужденная торием, что изучалось ранее одним из авторов настоящей работы [5].

Кроме того, Эльстер и Гейтель показали, что вещество, вызывающее радиоактивность, можно удалить растворением в кислоте. После испарения раствора в сосуде остается активный осадок, распадающийся со временем. Это также находится в удивительном согласии с тем, что мы получали ранее в опытах с активностью, возбужденной торием [5].

Как в опытах Эльстера и Гейтеля, так и в опытах Вильсона степень ионизации воздуха определялась по скорости, с которой слипаются листки электроскопа специальной конструкции. Это очень простой метод, часто использующийся во многих опытах, но он занимает, вообще говоря, много времени и во многих случаях не позволяет нужным образом изменять условия опыта.

---

* Philosophical Magazine, December 1902, ser. 6, 4, 704—723. Доложено Американскому физическому обществу 27 декабря 1901 г. Краткое сообщение опубликовано в Phys. Zs., 11, 1902.

В представленном исследовании авторы использовали для наблюдения ионизации и измерения радиоактивности, возбужденной воздухом, чувствительный квадрантный электрометр.

Мы использовали модифицированный электрометр Долежалека, описанный в работе [6]. Это обычный квадратный электрометр с очень тонкой стрелкой из серебряной бумаги, подвешенной на тонкой кварцевой нити. Такой прибор, сконструированный Бартельсом из Геттингена, предназначался для измерения небольшой разности потенциалов в работах по электрохимии. Для наших целей в электрометре было необходимо полностью сменить изоляцию и изменить способ связи квадрантов. В наших опытах стрелка электрометра заряжалась раз в два дня от батареи напряжением 200 *в* с помощью тонкой проволочки, которая подводилась к стрелке. Было обнаружено, что за 24 *час* стрелка теряет не более 10% своего заряда. Благодаря небольшому весу стрелки ее колебания затухали достаточно быстро и никаких дополнительных демпфирующих элементов не требовалось. Отклонение стрелки наблюдалось с расстояния 2 *м* с помощью осветителя и шкалы. Нулевая точка прибора оказалась очень стабильной. В первом опыте, как только была установлена стрелка, электрометр давал отклонение около 1800 *мм* шкалы при э.д.с. между квадрантами, равной 1 *в*, причем стрелка была заряжена до 200 *в*. Затем во время опыта прибор был случайно поврежден, и когда мы сменили кварцевую нить, то при том же напряжении электрометр давал в 4 раза меньшее отклонение. При измерении очень малой скорости разряда, вызванного спонтанной ионизацией воздуха, очень существенно принять меры против любого электростатического возмущения. Электрометр и все подводящие к нему провода были заключены в заземленные проволочные сетки. Пол и расположенные поблизости деревянные стойки с измерительными приборами были покрыты металлом и заземлены. Квадранты разделялись с помощью специального ртутного ключа, управляемого на расстоянии шнуром.

Изоляторы, применяемые в экспериментальной установке, разряжались в пламени до полного исчезновения заряда.

Образование возбужденной радиоактивности

Простейший способ получить значительную радиоактивность, наведенную воздухом, — это протянуть провод на открытом воздухе, зарядив его до высокого отрицательного потенциала. Через несколько часов провод нужно снять и намотать на рамку или же свернуть в виде плоской спирали. Затем обычным способом с помощью электрометра определяется ионизация, вызванная этим радиоактивным проводом в измерительном объеме. Эльстер и Гейтель в опытах по измерению образованной ионизации использовали электроскоп.

Чтобы проводник стал достаточно активным, его нужно зарядить до высокого отрицательного потенциала. В опытах использовались потен-

циалы от —5000 до —100 000 *в*. Положительно заряженный провод оставался совершенно неактивным, независимо от того, как долго его оставляли на открытом воздухе.

Уменьшение возбужденной активности

Возбужденное излучение, наведенное воздухом, со временем уменьшается так же, как излучение, возбужденное торием и радием, правда, с иной скоростью. Излучение, возбужденное торием, падало вдвое приблизительно через 11 *час*, тогда как активность, вызванная воздухом, при использованных нами напряжениях падала вдвое приблизительно за 45 *мин*. В работах [7] и [8] показано, что излучение, возбужденное радием, уменьшается нерегулярным образом и скорость этого уменьшения зависит от времени экспозиции. Сначала эта скорость велика, затем в течение некоторого времени она остается постоянной и, наконец, стремится к нулю, падая вдвое приблизительно за 30 *мин*. Таким образом, ясно, что скорость уменьшения возбужденной активности, наведенной в атмосфере, ближе к скорости уменьшения активности, возбужденной радием, нежели возбужденной торием.

В опытах, подробно описанных ниже, возбужденная активность наводилась в изолированном проводе длиной 15 *м*, выведенном из окна лаборатории на высоте около 15 *фут* над землей. Провод заряжался от машины Вимшурста, которая вращалась мотором. Потенциал провода определялся по величине пробойного промежутка между двумя латунными шариками. Чтобы иметь возможность изменять потенциал исследуемого провода в необходимых пределах, к проводу была подсоединена небольшая пластина, около которой помещался заземленный игольчатый электрод. Мы изменяли расстояние между этой пластинкой и электродом до тех пор, пока между шариками не переставала проскакивать искра. Такой метод оказался более приемлемым, нежели изменение скорости машины. После того, как провод находился на воздухе некоторое время, его быстро убирали и наматывали на прямоугольную металлическую рамку длиной 120 *см* и шириной 10 *см*.

Способ намотки показан на рис. 1; рамка помещена внутри измерительного цилиндра *B*. Измерительный цилиндр был сделан из металла и имел длину около 150 *см* и диаметр 30 *см*. Внешний цилиндр был подсоединен к батарее напряжением 100 *в*. Во избежание возникновения тока проводимости между *B* и *A* через элементы крепления изолятор *CD* был разрезан на две части, соединенные металлическим кольцом, которое заземлялось. Все устройство прибора можно легко понять из рисунка.

Излучение провода ионизовало газ внутри измерительного цилиндра, и ток между электродами измерялся обычным способом с помощью чувствительного электрометра. Исследуемое излучение ионизовало воздух слабо, поэтому мы работали с небольшим напряжением — всего 100 *в*.

Этого было достаточно, чтобы все ионы попадали на электроды, не успевая существенно рекомбинировать, и через газ шел максимально возможный ток.

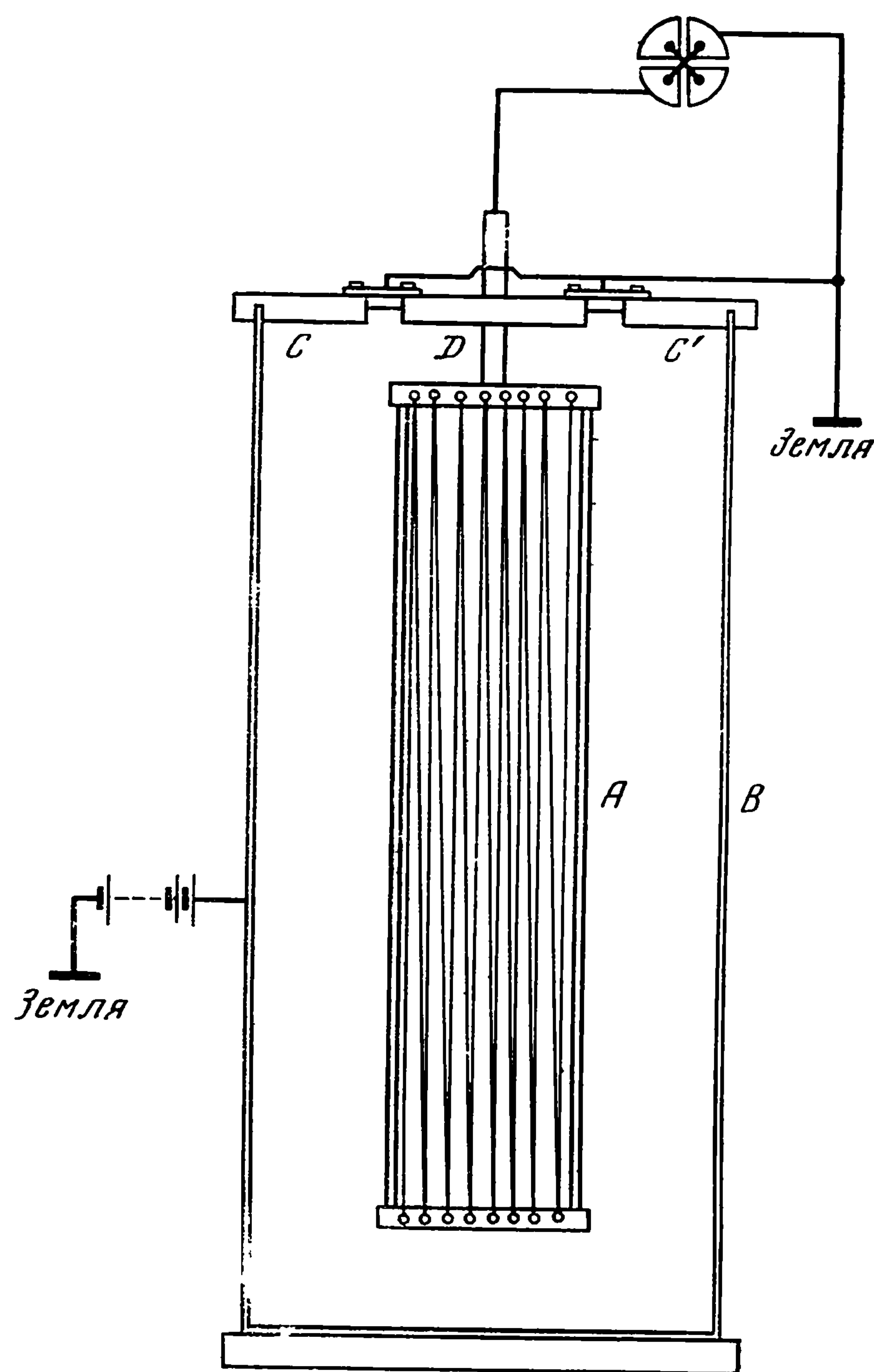


Рис. 1

На рис. 2 показана кривая *1* уменьшения активности, полученная с медным проводом, находившимся на воздухе в течение 210 *мин* под напряжением —26 000 *в*; кривая *2* получена с тем же проводом, находившимся на воздухе в течение 270 *мин* под напряжением —24 000 *в*. По оси ординат отложены деления электрометра в секунду, а по оси абсцисс — время в минутах.

В большинстве опытов, особенно если провод находился на воздухе несколько часов, оказалось необходимым параллельно электрометру подсоединять конденсатор, чтобы уменьшить скорость движения стрелки.

Если в измерительный цилиндр помещался неактивный провод, то вследствие спонтанной ионизации воздуха в цилиндре между электродами всегда протекал некоторый ток (соответствующий примерно 2,5 делениям в секунду). Учтя это обстоятельство, мы определили, что ток, пропорциональный интенсивности излучения, уменьшается со временем в геометрической прогрессии и в обоих случаях падает вдвое за время около 45 *мин*.

На рис. 3 представлена кривая уменьшения активности, полученная со свинцовым проводом, оставленным на 130 *мин* на чердаке под напряжением —25 000 *в*. Этот провод был смотан в виде плоской спирали и помещен в измерительный сосуд, состоящий из двух параллельных пластин, одна из которых была соединена с электрометром, другая — с батареей. В этом случае излучение также падает вдвое примерно за 45 *мин*.

Мы сняли много кривых убывания активности при очень различных атмосферных условиях, но существенной разницы в скорости этого спада не заметили, хотя *величина* активности, возбужденной за данный промежуток времени, очень сильно зависела от погоды и силы ветра. Скорость уменьшения активности была одинакова для медного и свинцового проводов и не зависела от их диаметра. В опыте с латунным стержнем, заряженным до напряжения —100 000 *в*, скорость уменьшения активности была такая же, как в опытах со свинцовым и медным проводами, заряжен-

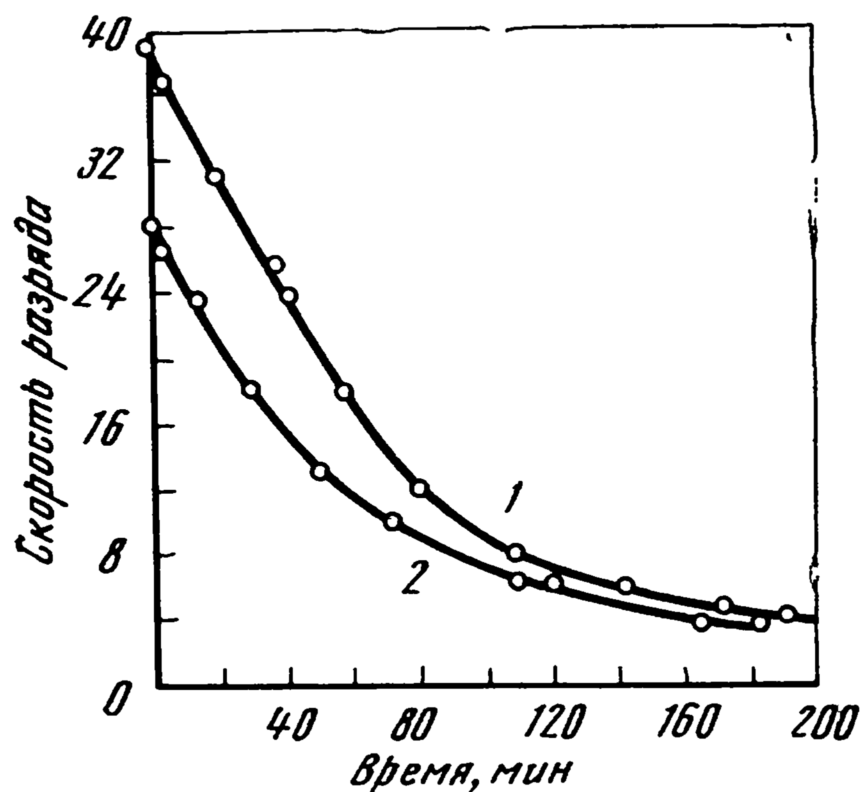


Рис. 2

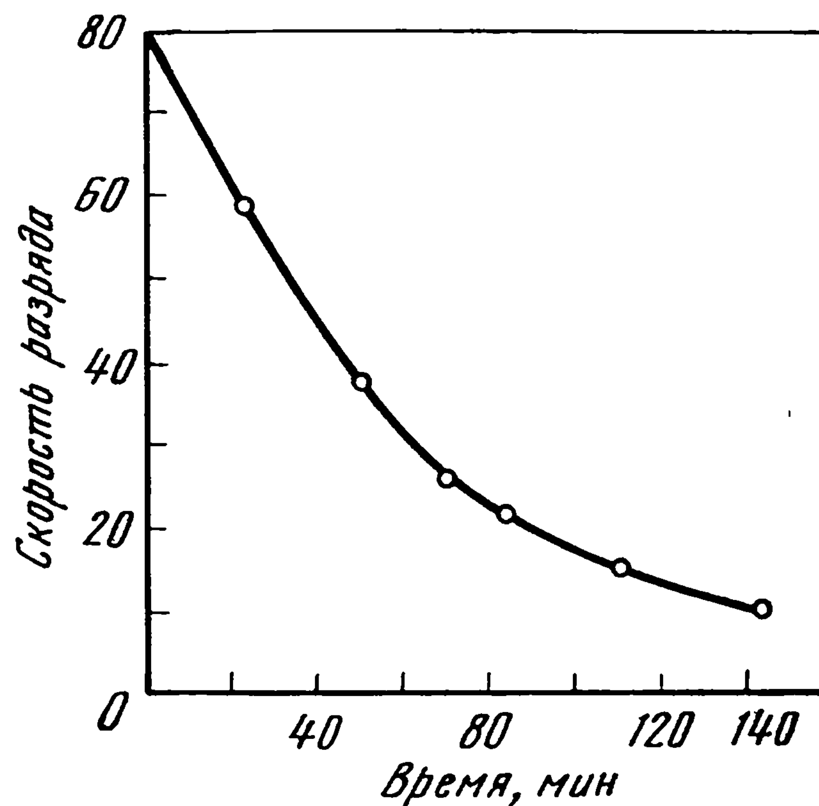


Рис. 3

ными до — 5000 *в*. При более низких напряжениях скорость спада активности не исследовалась.

Отсюда можно заключить, что в различных опытах, которые мы провели, скорость уменьшения активности постоянна и не зависит от условий опыта. В этом отношении ситуация напоминает также опыты с излучением, возбужденным торием и радием.

Из опытов по определению скорости убывания активности видно, что если первоначальная интенсивность возбужденного излучения равнялась I_0, то через промежуток времени t интенсивность I определяется выражением

$$I = I_0 e^{-\lambda t}.$$

Поскольку при t, равном 45 *мин*, $I = {}^1/_2\, I_0$, то

$$\lambda = 0{,}00026.$$

Если активность, возбужденная в проводе, вызвана радиоактивным веществом, осаждающимся с постоянной скоростью на проводе, а излучение этого вещества снижается со временем в соответствии с написанным выше уравнением, то отсюда сразу следует [5], что интенсивность I зависит от времени согласно формуле

$$I = I_0 (1 - e^{-\lambda t}),$$

где I_0 — максимальное значение интенсивности, достигаемое при очень большой экспозиции.

Если этот результат верен, то для данного провода и фиксированного напряжения возбужденная активность достигает половины максимального значения через 45 *мин*.

В этой связи мы провели несколько опытов, изменяя время экспозиции провода на воздухе. Однако оказалось, что величина возбужденной активности сильно изменяется от опыта к опыту, и таким способом доказать справедливость уравнения невозможно. Полученные результаты, однако, показали, что сначала активность возрастает пропорционально времени, а по прошествии 3—4 *час* она практически достигает максимума. Сейчас мы проводим более точные опыты, помещая провод не на открытом воздухе, а в закрытой комнате, что дает более стабильную величину активности.

Возбужденная радиоактивность, наведенная воздухом, возрастает при увеличении напряжения провода. Но поскольку величина возбужденной активности изменяется от часа к часу и ото дня к дню, то мы не смогли получить никаких определенных результатов относительно зависимости возбужденной активности от напряжения.

Влияние метеорологических условий

Мы провели много опытов, в которых пытались выяснить влияние атмосферных условий на величину возбужденной радиоактивности, наведенной воздухом. Обычно мы выводили провод из окна лаборатории на высоте 15 *фут* над землей и оставляли его на 30 *мин* под напряжением —25 000 *в*. Результаты опытов показали, что возбужденная активность очень сильно зависит от атмосферных условий.

В ясный солнечный день при прочих равных условиях возбужденная активность больше, чем в сумрачную облачную погоду. Влияние температуры практически не было замечено. Так, в ясный солнечный день зимой при температуре —20° С была получена несколько большая активность, чем в теплый ясный день весной. Наиболее существенным фактором, определяющим активность исследуемого провода, являлся ветер. В ветреный день мы всегда получали значительно больший эффект, чем в безветренный, хотя все остальные условия оставались теми же самыми. Так происходило всегда, независимо от того, было ли тепло или холодно, ясно или пасмурно.

Большинство опытов проводилось в Канаде в зимнее время, когда земля была покрыта снежным покровом толщиной около 2 *фут*. Преобладали северные ветры, проносящие воздух над областями, покрытыми снегом. Тот факт, что активность не зависит от присутствия снега, показывает, что возбужденную активность нельзя, по-видимому, объяснить каким-либо влиянием растительности. Кроме того, влажность, как нам кажется, слабо влияет на активность, поскольку при —20° С воздух очень сухой.

Проникающая способность возбужденного излучения

Как показано в предыдущей работе [8], проникающая способность излучений, возбужденных торием и радием, одинакова. Поскольку проникающая способность служит одним из признаков, по которым можно различить излучения различных типов, то мы поставили специальный опыт, чтобы сравнить проникающую способность излучения, наведенного воздухом, с другими известными излучениями радиоактивных веществ.

В этих опытах использовался свинцовый провод, так как его можно было легко уложить в виде плоской спирали. Провод экспонировался на воздухе в течение 2—3 *час* под напряжением —30 000 *в*. Затем провод свернули в плоскую спираль и поместили между плоскими пластинами прибора. Спираль накрывалась листочками тонкой алюминиевой фольги, и измерялся ионизационный ток. Средняя толщина алюминиевой фольги составляла 0,00034 *см*.

Результаты представлены на рис. 4 (верхняя кривая), где для сравнения приведены кривые для других типов излучения.

Радиоактивность, возбужденная воздухом, имеет бо́льшую проникающую способность, нежели любое не отклоняемое магнитным полем излучение радиоактивных препаратов урана, тория и радия, а также возбужденное излучение, вызываемое радием и торием.

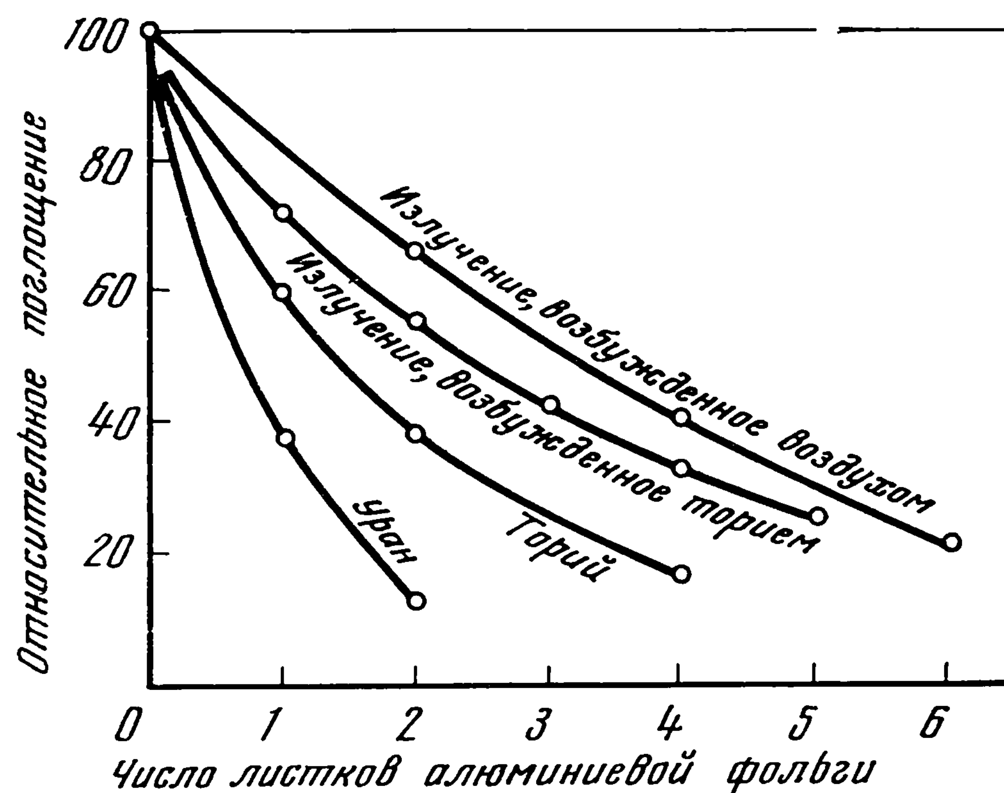


Рис. 4

Мы не проводили специальных опытов по поглощению возбужденного излучения в воздухе, однако приближенно величину этого поглощения можно легко вывести из уже известных величин. Как показали исследования различных типов излучения, если одно излучение поглощается в каком-нибудь материале (например, в алюминии) сильнее, чем другое, то это же излучение должно сильнее поглощаться и в воздухе. Так как

излучение, наведенное из атмосферы, поглощается в алюминии несколько слабее, чем излучение тория, то мы можем заключить, что оно слабее поглощается и в воздухе.

Известно, что интенсивность излучения, возбужденного торием, падает вдвое при прохождении через 1,6 *см* воздуха. Отсюда следует, что интенсивность излучения, наведенного воздухом, падает вдвое при прохождении через 2 *см* воздуха и почти полностью поглощается после прохождения через 10—12 *см*.

Различие в проникающей способности и времени распада приводит нас к выводу, что излучение, наведенное из атмосферы, нельзя объяснить присутствием в атмосфере какого-либо известного радиоактивного вещества.

Перенос возбужденной радиоактивности

Мы видели, что излучение, наведенное воздухом, во всех отношениях похоже на известные типы активности, возбуждаемые радием и торием. Во всех этих случаях при наличии электрического поля активность концентрируется на катоде и ее можно частично удалить, протерев поверхность тряпкой или растворив образец в кислоте.

Различная скорость падения активности и разная проникающая способность излучений не позволяют объяснить наблюдаемые явления наличием в атмосфере небольшого количества эманаций тория или радия. Но поскольку эти явления очень похожи между собой, то можно предположить, что процесс возбуждения активности в атмосфере подобен процессу возбуждения активности эманациями тория и радия. Один из авторов настоящей работы недавно показал [9], что в случае радиоактивных веществ активность возбуждается в результате переноса на катод положительно заряженных радиоактивных носителей. Эти носители движутся в электрическом поле приблизительно с той же скоростью, что положительные ионы, образованные в воздухе лучами Рентгена или Беккереля.

Не приходится сомневаться в том, что возбуждение активности связано с осаждением небольшого количества чрезвычайно радиоактивного вещества. Такое предположение хорошо объясняет растворение активности, а также тот факт, что радиоактивность может передаваться той тряпочке, которой протирают тело, обладающее активностью. Образование активности на воздухе никак нельзя приписать действию электрического поля на поверхность проводника. Если провод поместить в цилиндр, где объем воздуха невелик, то провод активным не становится, хотя на провод подается то же напряжение, что и в воздухе. Все факты, полученные к настоящему времени, неопровержимо подводят к заключению, что возбуждение активности связано с объемом воздуха, окружающего заряженный проводник. Поскольку активность собирается на катоде, то носители этой активности должны иметь положительный заряд. Эти носители могут получать положительный заряд либо при конденсации какого-то неустойчивого радиоактивного вещества на положительных

ионах, имеющихся в воздухе, либо при потере носителем отрицательного электрона. Последнее объяснение кажется более правдоподобным, поскольку нам теперь известно [10], что все радиоактивные вещества — торий, радий, уран,— а также активность, которая возбуждается торием и радием, обладают способностью спонтанно выбрасывать электроны.

Пока еще нет убедительных данных о происхождении и способе образования в воздухе этих радиоактивных носителей, но если предположить их наличие, то многие экспериментальные факты получат простое объяснение.

Чем выше потенциал провода, тем с большего расстояния носители могут попасть на катод. С этой точки зрения возбужденная активность провода, экспонированного на открытом воздухе, должна сильно увеличиваться при возрастании напряжения. Имеется убедительное доказательство, что провод, заряженный до высокого потенциала, собирает носители из большого объема воздуха. Экспериментально обнаружено, что величина возбужденной активности провода, заряженного до —20 000 *в* и помещенного в цилиндрический сосуд объемом 141 000 *см*^{3}, через который со скоростью 500 *см/сек* продувался внешний воздух, составляла всего несколько процентов от активности, наведенной на этот провод на открытом воздухе.

Увеличение возбужденной активности в те дни, когда дул сильный ветер, с этой точки зрения можно объяснить непрерывным поступлением новых носителей в сферу действия электрического поля. Поскольку провод представляет собой только коллектор радиоактивных носителей, собирающихся под действием электрического поля, то величина и природа возбужденного излучения не должны зависеть от материала проводника, что и наблюдается на опыте.

Таким образом, радиоактивные носители, по-видимому, непрерывно образуются каким-то веществом в атмосфере, но скорость их образования зависит от метеорологических условий. Наиболее благоприятна для этого, по-видимому, ясная солнечная погода.

Так как Земля почти всегда заряжена отрицательно по отношению к внешней атмосфере, то отсюда следует, что эти радиоактивные носители непрерывно осаждаются на ее поверхность. Таким образом, мы приходим к выводу, что Земля покрыта невидимым слоем сильного радиоактивного вещества, которое сильно ионизует воздух на несколько сантиметров от поверхности. Наличие этих носителей в общем объеме воздуха способствует образованию в атмосфере новых ионов, ибо каждый носитель действует, как излучающий центр. Холмы и горные вершины, а также любой большой массив скал или поднятие почвы, концентрируют земное электрическое поле так, что эти образования будут иметь бо́льшую радиоактивность на единицу площади, нежели равнинные места. С этой точки зрения наблюдения Эльстера и Гейтеля, указывающие на увеличение ионизации в районах поблизости от вершин, получают удовлетворительное объяснение.

Спонтанная ионизация воздуха

На рис. 5 показана экспериментальная установка, которая была использована для определения числа ионов, образующихся за 1 *сек* в 1 *см*^{3} воздуха, а также для измерения тока ионизации в зависимости от величины электрического поля.

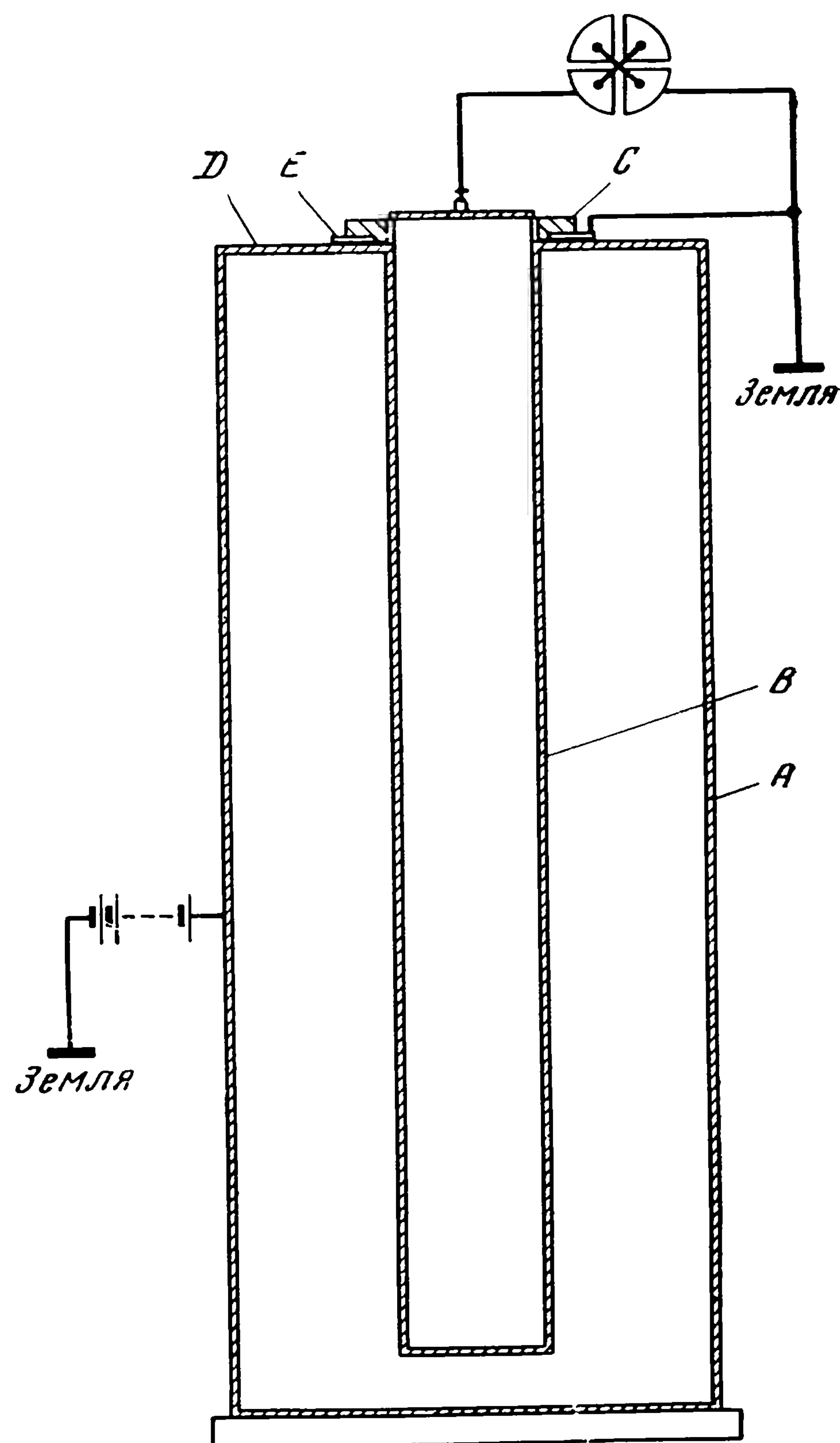


Рис. 5

Ток измерялся с помощью электрометра, подсоединенного между двумя концентрическими цинковыми цилиндрами *A* и *B* с внутренними диаметрами соответственно 25,5 и 7,5 *см* и длиной 154 *см*. Цилиндры были установлены вертикально, и их основания были закрыты. Большой цилиндр закрывался сверху цинковой пластиной, в центре которой было прорезано круглое отверстие, имеющее несколько больший диаметр, чем внутренний цилиндр. На верхней части внутреннего цилиндра был укреплен металлический фланец, который опирался на эбонитовое кольцо *C*. Между эбонитом и цинковой пластиной *D* было расположено тонкое металлическое кольцо *E*, соединенное с землей. Это кольцо лежало на аналогичной кольцевой картонной прокладке, которая служила дополнительным изолятором. Тонкое металлическое кольцо, соединенное с землей, играло роль охранного кольца и поэтому даже при большой разности потенциалов между цилиндрами ток по изолятору внутреннего цилиндра, соединенного обычным способом с электрометром, протекать не мог. Внешний цилиндр был соединен с одним полюсом небольшой батареи элементов, другой полюс которой был заземлен. При разности потенциалов в несколько вольт между электродами протекал ионизационный ток и стрелка электрометра начинала достаточно быстро двигаться.

Цилиндр был достаточно хорошо воздухонепроницаем, и мы приняли меры против различных механических возмущений. Ток между цилиндрами измерялся через определенные промежутки времени в течение месяца. Чтобы исключить ошибки, связанные с небольшим изменением чувствительности электрометра ото дня ко дню, мы одновременно измеряли ионизационный ток от стандартного источника из окиси урана, располо-

женного между двумя параллельными изолированными пластинами. Предварительные опыты показали, что окись урана представляет собой очень стабильный источник излучения.

Ниже в таблицах показано изменение тока, вызванного спонтанной ионизацией воздуха, в зависимости от разности потенциалов между цилиндрами. В табл. 1 приведены данные наблюдения, когда воздух в течение месяца находился в закрытом сосуде; в табл. 2 приведены данные для обычного комнатного воздуха через несколько часов после того, как им заполнили прибор.

Таблица 1

Разность потенциалов, *в*	Ток за 1 *сек*, деления электрометра	Разность потенциалов, *в*	Ток за 1 *сек*, деления электрометра
0,4	0,34	6,5	0,67
0,8	0,50	13	0,71
2,1	0,59	26	0,72
4,2	0,65	52	0,73

Таблица 2

Разность потенциалов, *в*	Ток за 1 *сек*, деления электрометра	Разность потенциалов, *в*	Ток за 1 *сек*, деления электрометра
0,2	0,04	13	0,61
1,05	0,22	26	0,65
2,1	0,32	39	0,67
6,5	0,52	52	0,68

Результаты показаны графически на рис. 6. Кривая *I*—данные табл. 1, кривая *II* — данные табл. 2.

Полученные кривые очень похожи на те, которые получаются при ионизации воздуха лучами Рентгена и Беккереля. Сначала ток возрастает приблизительно пропорционально напряжению, но вскоре достигается такое состояние, когда значительное изменение напряжения приводит только к небольшому увеличению тока. Вследствие слабой ионизации воздуха и соответственно небольшой скорости рекомбинации ионов максимальный ток достигается при очень маленьком напряжении. Макси-

мальные токи при напряжении 50 *в* для двух проб воздуха различаются мало, однако кривая *I* достигает максимума гораздо раньше, чем кривая *II*. Вероятно, это происходит потому, что в последнем случае в воздухе присутствовали частички пыли. Некоторые ионы при медленном движении между цилиндрами отдают заряд пылевым образованиям. Этот процесс увеличивает скорость рекомбинации ионов, и для достижения максимального тока нужно соответственно большее электрическое поле.

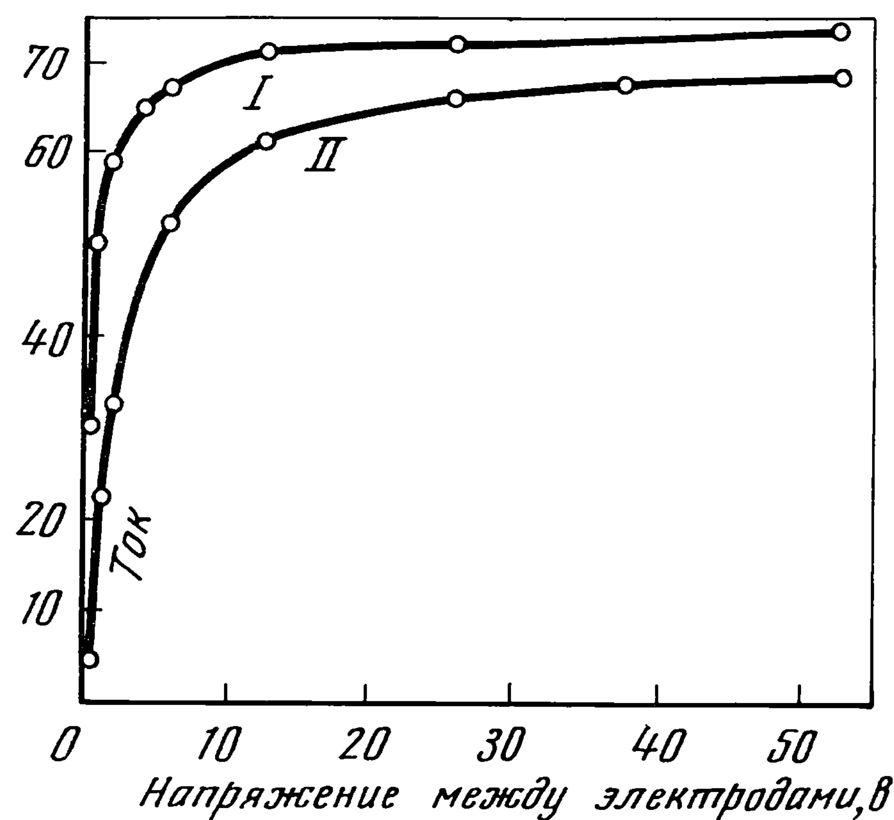


Рис. 6

Емкость электрометра, цилиндра и всех соединений была 150 *эл.-стат. ед.*, а 1 *мм* шкалы электрометра соответствовал 0,00182 *в*. Средняя скорость движения стрелки электрометра при напряжении 50 *в* между цилиндрами составляла 100 делений за 132 *сек*. Таким образом, ток между цилиндрами составлял

$$6{,}9\cdot 10^{-4}\ \textit{эл.-стат. ед.},\ \text{или}\ 2{,}3\cdot 10^{-13}\ \textit{а}.$$

Объем воздуха между цилиндрами составлял 71 200 *см*^{3}. Если принять, что заряд иона, как было найдено Дж. Дж. Томсоном [11], равен $6{,}5\cdot 10^{-10}$ *эл.-стат. ед.*, то мы получим, что в 1 *см*^{3} за 1 *сек* образуется 15 ионов. Это мало отличается от значения 19 ионов, полученного Вильсоном в опытах с воздухом, заключенным в сосуде из посеребренного стекла, в которых измерения проводились с помощью электроскопа.

При наблюдениях в продолжение месяца и более никаких существенных изменений тока мы не заметили. Образование возбужденной радиоактивности в воздухе привело нас к мысли, что в воздухе, вероятно, имеется радиоактивная эманация, которая и вызывает наблюдаемую ионизацию. Если это так, то ее излучающая способность уменьшается очень медленно или же эманация непрерывно образуется в замкнутом объеме.

Применение теории ионизации

При спонтанной ионизации воздуха мы имеем дело с чрезвычайно малой скоростью образования ионов и интересно установить, насколько экспериментальные результаты согласуются с теорией ионизации газов. Эта теория ранее проверялась для случаев, когда ионизация была во много тысяч раз интенсивнее. Мы уже отмечали, что зависимость тока от напряжения, вообще говоря, согласуется с теорией.

Если не прикладывать электрического поля, то число ионов n в 1 *см*^{3} возрастает до тех пор, пока скорость образования ионов не сравняется

со скоростью рекомбинации, т. е. $q = \alpha n^2$, где q — скорость образования ионов, а α — постоянная рекомбинации.

Мы определили, что $q = 15$, а Мак-Кланг [12] нашел, что для рекомбинации ионов в воздухе, находящемся под действием рентгеновского излучения,

$$\alpha \approx 3400e,$$

где e — заряд иона.

Подставив эти величины, найдем

$$n = 2600,$$

т. е., иначе говоря, в равновесном состоянии в 1 *см*³ находится в 173 раза больше ионов, чем их образуется за 1 *сек*. Если для этого количества ионов определить время t, за которое число ионов уменьшится наполовину, при условии, что новые ионы не образуются, то мы получим

$$t = \frac{1}{\alpha N} = 174 \text{ сек.}$$

Мы можем сравнить, хотя бы приближенно, измеренную нами зависимость тока от напряжения (см. кривую I на рис. 6) с теорией, исходя из следующих соображений.

Электрическое поле X на расстоянии r от центра концентрических цилиндров радиусами b и a определяется формулой

$$X = \frac{V}{r \ln (b/a)} = \frac{0{,}82V}{r},$$

если вместо b и a подставить их значения для цилиндров, изображенных на рис. 5.

Теперь, если N — максимальное число ионов в 1 *см*³, i — ток на единицу длины цилиндра в любом сечении и приложена небольшая разность потенциалов V, то можно записать

$$i = 2\pi NeuX,$$

где u — сумма скоростей положительных и отрицательных ионов при поле, равном единице.

Подставив значение X, получим

$$i = 1{,}64\pi NeuV.$$

Если I — максимальный ток, который достигается, когда все образующиеся ионы попадают на электроды, то

$$I = qe\pi (b^2 - a^2)$$

и

$$\frac{i}{I} = \frac{1{,}64NuV}{q (b^2 - a^2)}.$$

При разности потенциалов 0,36 *в* ток составляет 0,4 максимального значения (см. табл. 1).

Немного ниже мы покажем, что скорость ионов, образующихся в воздухе, приблизительно такая же, как и ионов, образованных лучами Рентгена. Таким образом, величина u (сумма скоростей отрицательных и положительных ионов) при градиенте 1 *в/см* составляет около 3,2 *см/сек.*

Подставив эти значения, получим

$$\frac{N}{q} = 32.$$

Принимая во внимание, что до того, как произойдет рекомбинация, 0,4 всего числа ионов уносится током, и при отсутствии напряжения можно приблизительно записать

$$\frac{N}{q} = \frac{32}{0,6} = 53.$$

Выше мы показали, что если взять ту же величину α, что и для сильной ионизации, то

$$\frac{N}{q} \text{ должно быть равно } 174,$$

т. е. в 3 с лишним раза больше.

Однако имеется ряд причин, которыми можно объяснить уменьшение экспериментально измеренных величин по сравнению с теоретическими. Прежде всего, мы не делали никаких поправок на диффузию ионов к основаниям цилиндров. Можно показать, что это достаточно сильно уменьшает величину N/q.

Из кривой *II* (см. рис. 6) видно, что на зависимость тока от напряжения существенно влияет наличие пыли. Кроме того, для простоты вычисления мы предполагали, что движение ионов не влияет на градиент потенциала. Однако и эксперимент, и теория показывают, что вблизи электродов потенциал резко падает и электрическое поле на некотором расстоянии от электродов становится меньше, чем в том случае, когда ионы отсутствуют. Все эти три фактора действуют в одну сторону, существенно уменьшая величину N/q. Таким образом, можно считать, что согласие между теорией и опытом имеется, если учесть условия, в которых проводится опыт.

Полученные результаты ясно показывают, что когда воздух находится в закрытом сосуде и не приложено электрического поля, то при равновесии между скоростью образования ионов и их диссипацией в единице объема находится в 50 раз больше ионов, чем их образуется за 1 *сек* в той же единице объема.

Скорость ионов

Мы провели несколько опытов для того, чтобы приблизительно оценить скорость ионов, которые спонтанно образуются в воздухе, и одновременно найти число ионов в единице объема наружного воздуха.

Для этой цели использовался прибор, показанный на рис. 7. Поступающий извне воздух с помощью вентилятора, вращаемого мотором, продувался через цинковый цилиндр длиной 200 *см* и диаметром 30 *см*.

В трубе воздух проходил через три круглые сеточки *A*, *B* и *C*, сделанные из параллельных проволочек, расположенные на расстоянии 2 *см* одна от другой и изолированные электрически. Первая сеточка *A* была заземлена, вторая сеточка *B* подсоединена к электрометру, а третья сеточка *C* — к одной из клемм батареи, вторая клемма которой была заземлена. Между сеточками *B* и *C* было расположено охранное кольцо, соединенное с землей, которое предотвращало утечку тока по изолятору между *B* и *C*.

Предположим, что сеточка *C* заряжена положительно. Положительные ионы, переносимые потоком воздуха между сеточками, начинают

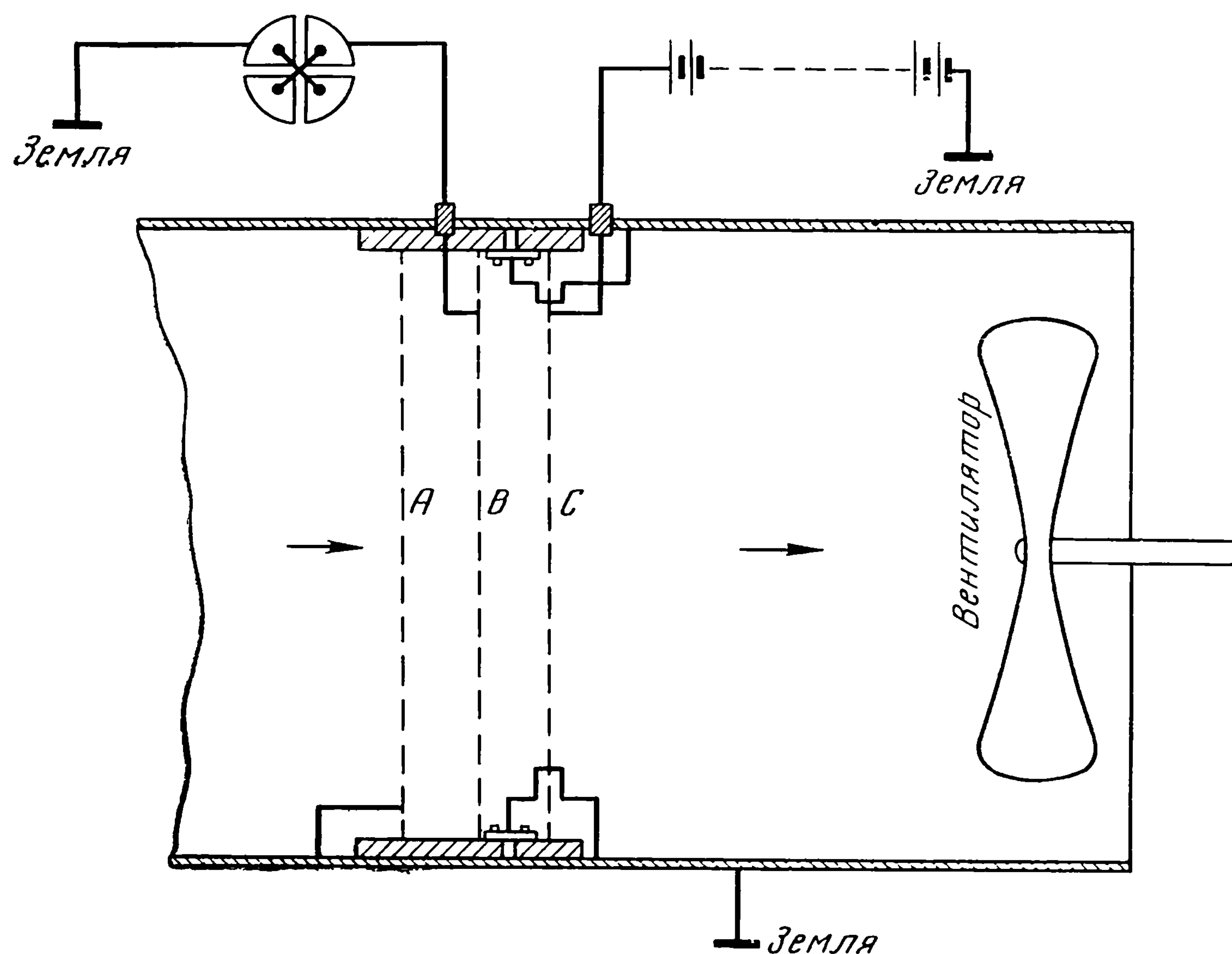


Рис. 7

двигаться против потока, тогда как отрицательные ионы движутся вместе с потоком к положительному электроду. Если скорость положительных ионов в электрическом поле больше скорости потока воздуха, все они

попадут на сеточку B и при данном потоке воздуха ток, регистрируемый электрометром, при увеличении силы электрического поля изменяться не будет.

Опыт показал, что даже при небольшом электрическом поле на сеточку B идет некоторый ток. При увеличении напряжения этот ток практически достигает максимума. Результаты опыта показаны графически на рис. 8. Скорость потока воздуха составляла 100, 205 и 250 *см/сек*, причем сеточка C была заряжена положительно. Из этих кривых видно, что при скорости 250 *см/сек* максимальный ток достигается при разности потенциалов около 350 *в*. Так как сеточки расположены на расстоянии 2 *см*, то скорость положительных ионов K при градиенте потенциала 1 *в/см* определяется из выражения

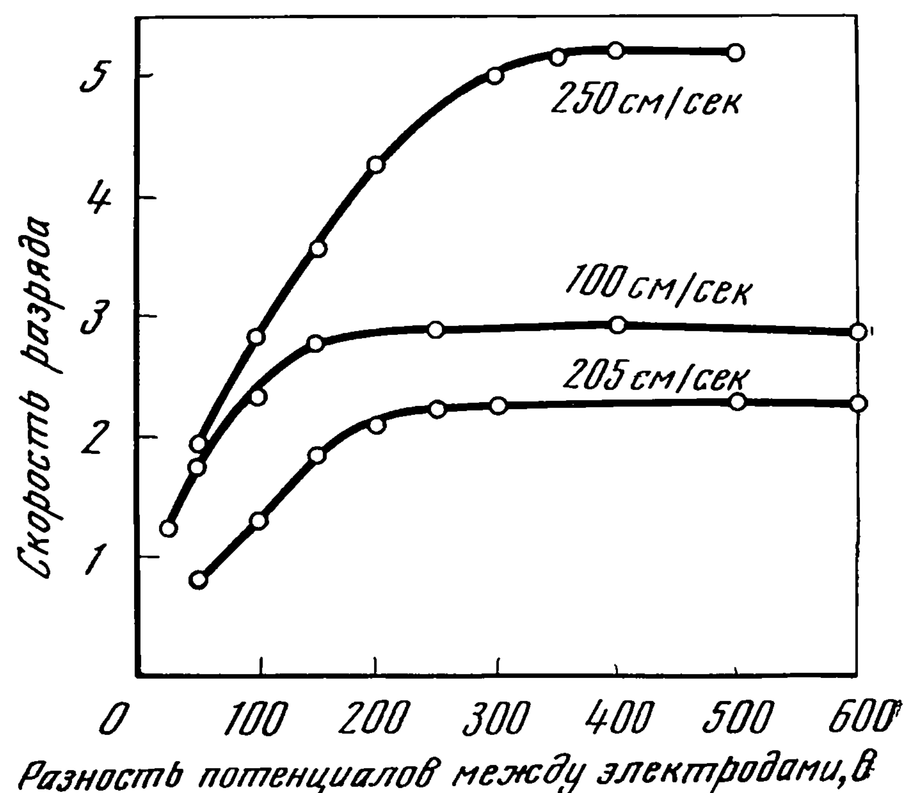


Рис. 8

$$K = \frac{2u}{V} = \frac{2\cdot 250}{350} = 1{,}4 \text{ см/сек},$$

где u — скорость потока воздуха; V — минимальная разность потенциалов, при которой достигается максимальный ток. Из двух других кривых скорость положительных ионов получается также равной около 1,4 *см/сек*. Более точного результата для скорости ионов получить не удалось, поскольку проводимость продуваемого воздуха во время проведения серии наблюдений изменялась. Кривые, показанные на рис. 8, были получены в те дни, когда проводимость менялась слабо.

Аналогичные опыты, поставленные с целью определить скорость отрицательных ионов, не привели к определенному результату потому, что измеряемые величины во время опыта менялись. Эти опыты показали, что скорости ионов разного знака приблизительно одинаковы, но, как и в опытах с лучами Рентгена и Беккереля, не удалось определить, движутся ли отрицательные ионы несколько быстрее, чем положительные.

Результаты, полученные в опытах по определению скорости ионов, имеют приближенный характер, однако они показывают, что ионы, спонтанно образованные в воздухе, движутся в электрическом поле приблизительно с той же скоростью, что и ионы, образованные лучами Рентгена и Беккереля. Зелени [13] определил, что сумма скоростей отрицательных и положительных ионов, образуемых лучами Рентгена в сухом воздухе, составляет около 3,2 *см/сек*.

Изменение числа ионов в воздухе

По измерению *максимального* тока между сеточками можно оценить число ионов в единице объема продуваемого потока воздуха.

Если A — площадь сечения цилиндра; u — средняя скорость потока воздуха; N — число ионов в единице объема, то максимальный ток i, измеряемый электрометром, можно найти из выражения

$$i = AuNe,$$

где e — заряд иона.

Подставляя в это уравнение измеренные величины i, A и u, можно найти величину N. Мы обнаружили, что значение N изменяется от часа к часу и ото дня ко дню. Ниже приведены некоторые из полученных значений числа ионов в единице объема:

20	ноября	1901 г.	40	27	ноября	1901 г.	16
21	»	»	30	30	»	»	13
23	»	»	14				

Температура воздуха в большинстве этих наблюдений была около —12° С. Было замечено, что в ясный солнечный день величина N больше, нежели в пасмурный день.

Г. Эберт [14] использовал очень похожий прибор для определения числа ионов в воздухе, но в его опытах воздух продувался между двумя концентрическими цилиндрами, а вместо электрометра он применял электроскоп.

Из полученных выше результатов мы видим, что по измерениям трех последних дней число ионов на единицу объема в воздухе приблизительно равно числу ионов, образующихся в замкнутом сосуде за 1 *сек*. Это число удивительно мало, если принять, что внешний воздух ионизуется с такой же скоростью, как и воздух внутри закрытого сосуда. В этой работе мы показали, что в замкнутом объеме в 1 *см*^{3} содержится в 50 раз больше ионов, чем образуется за 1 *сек*, до того как скорость рекомбинации достигнет скорости образования ионов.

Сделав необходимые поправки на причины, вызывающие некоторую потерю ионов, а именно — на наличие в воздухе пыли и других частиц, на электрическое поле между Землей и внешней атмосферой, окажется, что число ионов в единице объема много меньше ожидаемого. Возможно, что спонтанная ионизация воздуха, наблюдаемая в замкнутых сосудах, происходит (по крайней мере частично) благодаря *излучению*, непрерывно испускаемому стенками сосуда. С этой точки зрения спонтанная ионизация внешнего воздуха, вероятно, существенно меньше, чем в замкнутом сосуде, и число ионов в единице объема соответственно меньше.

Мак-Гиллский университет, Монреаль,
9 июня 1902 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Elster, Geitel.* Phys. Zs., November 24, 1900.
2. *Wilson C. T. R.* Proc. Roy. Soc., March, 1901.
3. *Wilson C. T. R.* Proc. Roy. Soc., December, 1901.
4. *Elster, Geitel.* Phys. Zs., 1901, 3, 76; 1901, **40**, 590.
5. *Rutherford E.* Phil. Mag., February, 1900.
6. *Dolezalek.* Instrumenten Kunde, Dec., 1901.
7. *Rutherford E.* Phys. Zs., 1902, **12**, 254.
8. *Rutherford E., Brooks. G.* Phil. Mag., July, 1902.
9. *Rutherford E.* Phys. Zs., 1902, **10**, 210.
10. *Rutherford E., Crier A. G.* Phys. Zs., 1902, **17**, 385.
11. *Thomson J. J.* Phil. Mag., 1898.
12. *McClung R. K.* Phil. Mag., March, 1902.
13. *Zeleny J.* Phil. Trans. Roy. Soc., 1900.
14. *Ebert H.* Phys. Zs., 1901, 46.

1903

12

ВОЗБУЖДЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ И СПОСОБ ЕЕ ПЕРЕНОСА*

Содержание

§ 1. Введение
§ 2. Связь между возбужденной радиоактивностью и эманацией
§ 3. Способ переноса возбужденной активности
§ 4. Скорость носителей возбужденной активности тория
§ 5. Увеличение интенсивности возбужденных излучений со временем
§ 6. Возбужденная активность радия
§ 7. Распределение возбужденной активности на аноде
§ 8. Скорость носителей
§ 9. Происхождение носителей
§ 10. Природа излучений
§ 11. Химические превращения радиоактивных веществ
§ 12. Основные результаты

§ 1. Введение

Одно из наиболее интересных свойств радиоактивных веществ тория и радия — их способность сообщать, или возбуждать [1] временную радиоактивность всем находящимся вблизи них телам. Если в замкнутый металлический сосуд, содержащий соединение тория или радия, поместить проволоку, заряженную до высокого отрицательного потенциала, то почти вся возбужденная радиоактивность сосредоточится на отрицательном электроде. Если же проволока заряжена положительно, то возбужденная радиоактивность образуется на стенках сосуда, а проволока останется неактивной.

В отсутствие электрического поля возбужденная радиоактивность образуется на поверхностях всех тел, находящихся в этом закрытом сосуде, независимо от того, проводники ли они или изоляторы.

В предыдущих статьях мы показали, что между возникновением возбужденной радиоактивности и существованием радиоактивной эманации

---

* Philosophical Magazine, January 1903, ser. 6, 5, 95—117. Предварительные сообщения об этих результатах были доложены Американскому Физическому обществу в Нью-Йорке 27 декабря 1901 г. и опубликованы в журнале Phys. Zs., 1902, № 10.

[1] В этих исследованиях принят термин «возбужденная активность» вместо предпочитаемого многими физиками термина «наведенная активность». Я избегал пользоваться последним термином, поскольку он, на мой взгляд, наводит на мысль, что этот эффект каким-то образом обусловлен неким воздействием через среду, тогда как описываемые в этой статье эксперименты убедительно показывают, что возбужденная радиоактивность переносится потоком положительно заряженных носителей.

у тория и радия имеется прямая связь. В настоящей работе будет показано, что образование возбужденной активности есть одно из свойств эманации тория и радия. Возбужденная активность обусловлена осаждением на поверхности тел радиоактивного вещества, переносимого положительно заряженными носителями, движущимися в воздухе под действием электрического поля примерно с той же скоростью, что и положительный ион, образующийся в воздухе под действием лучей Рентгена.

§ 2. Связь между возбужденной радиоактивностью и эманацией

В предыдущей работе [1] я показал, что соединения тория непрерывно испускают радиоактивную эманацию. Радиоактивность этой эманации быстро убывает, и в течение 1 *мин* уменьшается вдвое. Позднее Дорн показал, что радий также испускает эманацию, особенно при нагревании. Эта эманация распадается во много раз медленнее, чем эманация тория. В экспериментах с эманацией радия, находящейся в смеси с воздухом в замкнутом металлическом сосуде, я нашел, что ее активность падала вдвое за несколько дней, и даже через месяц была еще вполне заметна.

Эти эманации, испускаемые торием и радием, во всех отношениях похожи на радиоактивные газы или пары. Они быстро диффундируют в газах и через пористые вещества типа бумаги. Однако, в противоположность ионам газов, которые образуются на их пути, эманации проходят через фильтры из ваты и пробулькивают через растворы, не испытывая сколько-нибудь заметного поглощения. В более подробном исследовании [2] было показано, что эманация тория ведет себя подобно инертному газу и что ни температура, ни другие самые сильные воздействия не влияют на ее активность.

Данные о скорости диффузии этих эманаций говорят о том, что они, по всей вероятности, должны обладать значительным молекулярным весом. Исследование скорости диффузии эманации радия в воздухе, предварительные результаты которого опубликованы в работах [3, 4], показало, что, по-видимому, молекулярный вес эманации лежит где-то в пределах от 40 до 100. Определить с уверенностью скорость диффузии эманации тория в воздухе и других газах пока не удалось вследствие быстрого уменьшения ее активности.

Эманации тория и радия обладают весьма похожими свойствами. Обе эманации легко диффундируют через стекло и пористые вещества, обе обладают способностью ионизовать вокруг себя газ и образовывать возбужденную радиоактивность.

Различия между этими эманациями можно легко объяснить, предположив, что обе они представляют собой радиоактивный газ или пар с различным молекулярным весом. Согласно результатам предыдущих работ, радиоактивность есть процесс, сопровождающий химическое превращение. С этой точки зрения разница в скоростях распада радиоак-

тивности обеих эманаций лишь указывает на разницу в скорости их химического превращения, а вовсе не означает какого-либо фундаментального различия в их природе.

В отличие от излучения самих эманаций, возбужденное излучение, вызванное торием, ослабевает во много раз медленнее, чем возбужденное излучение радия [5]. При этом химическое превращение в веществе — источнике возбужденной активности радия — протекает значительно быстрее, чем в случае возбужденной активности тория.

Возбужденная радиоактивность всегда возникает на телах, когда присутствуют радиоактивные эманации тория и радия. Чтобы показать весьма тесную связь между возбужденной радиоактивностью и присутствием этих эманаций, напомним следующие экспериментальные факты:

1. Возбужденную радиоактивность вызывают только те радиоактивные вещества, которые испускают эманации, т. е. торий и радий. Уран и полоний, не испускающие эманации, возбужденной активности не образуют.

2. Интенсивность возбужденного излучения, вызванного соединениями тория и радия, прямо пропорциональна количеству присутствующей эманации. Например, окись тория испускает значительно больше эманации и создает значительно большую возбужденную активность, нежели нитрат тория в твердом состоянии. Окись тория и хлорид радия, обезгаженные, частично деэманированные при сильном нагревании, одинаково теряют свою способность возбуждать активность.

3. Возбужденная радиоактивность может возникнуть на телах в присутствии эманации, даже если само радиоактивное вещество отсутствует. Она может возникать на больших расстояниях от радиоактивного препарата, если эманацию, смешанную с воздухом, подавать туда по трубкам. Эманация радия, введенная в сосуд путем продувания потока воздуха над активным веществом, образует возбужденную радиоактивность по истечении месяца, несмотря на то, что самого радиоактивного вещества поблизости уже нет. Однако способность соединений тория или радия образовывать на близлежащих телах возбужденную активность почти полностью исчезает, если над этим соединением продувать поток воздуха, который уносит эманацию по мере ее образования.

Количество эманации и возбужденная активность прямо не связаны с радиоактивностью препарата, находящегося поблизости, и их нельзя приписать какому-то действию непосредственного излучения на газ, через который оно проходит. Так, возбужденная активность от деэманированной окиси тория составляет малую долю возбужденной активности, производимой обычной окисью тория того же веса, хотя процесс удаления эманации не очень сильно влияет на интенсивность прямого излучения.

§ 3. Способ переноса возбужденной активности

Для возбужденной радиоактивности характерна способность сосредоточиваться на катоде в сильном электрическом поле. Поэтому вполне возможно, что возбужденная радиоактивность обусловлена движением в электрическом поле неких положительно заряженных носителей. Были предприняты эксперименты для проверки этого предположения и определения скорости, с которой эти носители движутся в электрическом поле, и грубой оценки их размеров по сравнению с ионом газа.

Для определения этой скорости, использовался видоизмененный метод, применявшийся ранее [6] для измерения скорости отрицательных ионов, образующихся на поверхности металла при освещении ее ультрафиолетовым светом. В этом методе используется переменное электрическое поле. Постоянная разность потенциалов с помощью вращающегося коммутатора преобразовывалась в переменное напряжение известной частоты. Если такое переменное поле приложить к двум параллельным пластинам, пространство между которыми равномерно заполнено радиоактивной эманацией, то на каждом электроде образуется одинаковое количество возбужденной активности.

Если последовательно с переменной разностью потенциалов $\pm E_0$ включена батарея с э.д.с. $E_1 < E_0$, то положительный носитель в течение одного полупериода движется в более сильном электрическом поле, нежели в течение другого полупериода. Следовательно, в течение двух полупериодов носитель проходит неравные расстояния, так как скорость носителя пропорциональна напряженности электрического поля, в котором он движется. Отсюда следует, что возбужденная радиоактивность на обоих электродах будет неодинаковой. Если частота, с которой изменяется направление поля, достаточно велика, то одной из пластин могут достичь только те положительные носители, которые находятся внутри тонкого слоя определенной толщины, примыкающего к этой пластине, а все остальные носители за несколько периодов будут попадать на другую пластину.

Предположим, что A и B (рис. 1) — две параллельные пластины, на которых возбуждается радиоактивность, и что эманация равномерно распределена между ними. Допустим, что, когда пластина B заряжена отрицательно, разность потенциалов между пластинами достигает $E_0 - E_1$, а когда пластина B заряжена положительно, разность потенциалов равна $E_0 + E_1$.

Пусть d — расстояние между пластинами; T — полупериод изменения направления поля; ρ — отношение возбужденной радиоактивности на пластине B к суммарной радиоактивности на пластинах A и B; K — скорость положительных носителей при единичном градиенте потенциала.

Предполагая, что электрическое поле между пластинами однородно и что скорость носителя пропорциональна напряженности электрического

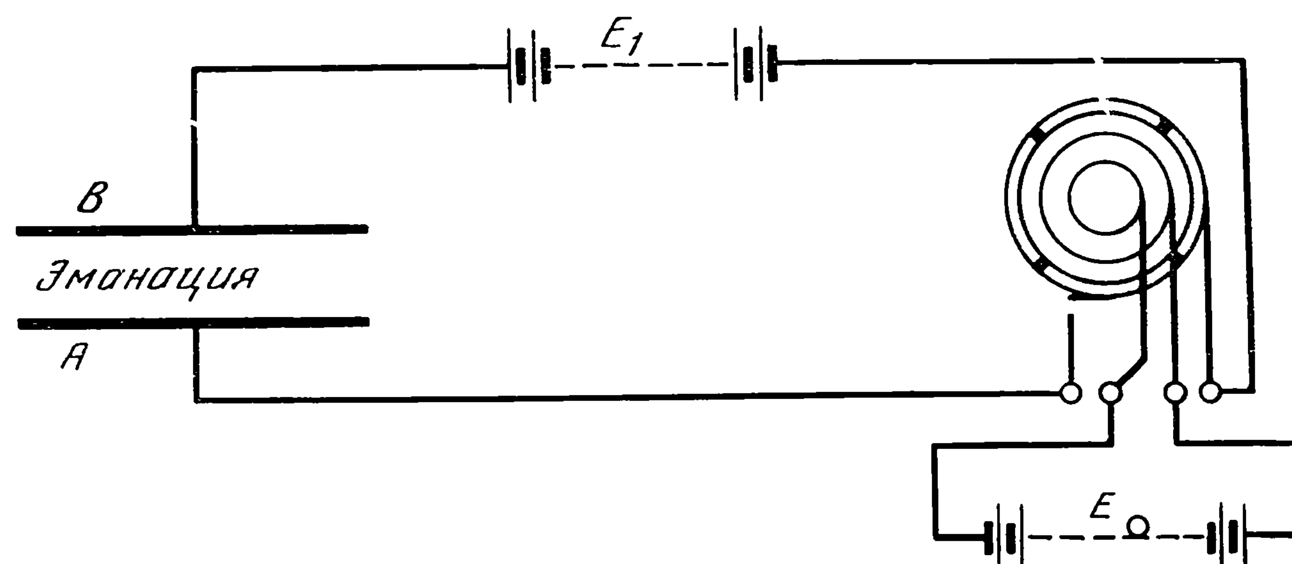


Рис. 1

поля, получим скорость положительного носителя при движении к пластине B:

$$\frac{E_0 - E_1}{d} K,$$

а в течение другого полупериода, при движении к пластине A,—

$$\frac{E_0 + E_1}{d} K.$$

Таким образом, максимальные расстояния[1] x_1 и x_2, которые может пройти положительный носитель в течение двух последовательных полупериодов, равны

$$x_1 = \frac{E_0 - E_1}{d} KT; \qquad x_2 = \frac{E_0 + E_1}{d} KT.$$

Предположим, что положительные носители образуются с постоянной скоростью q единиц в секунду на единицу расстояния между пластинами. Тогда число положительных носителей, попадающих на пластину B в течение одного полупериода, можно выразить в виде двух членов:

1) половина тех носителей, которые образуются на расстоянии не больше x_1 от пластины B; их число равно

$$\frac{1}{2} x_1 qT;$$

2) все носители, которые к концу предыдущего полупериода остаются на расстоянии, меньшем x_1; их число, как легко показать, равно

$$\frac{1}{2} x_1 \frac{x_1}{x_2} qT.$$

Все остальные носители, образующиеся между пластинами A и B в течение полного периода поля, с течением времени попадут на пластину

---

[1] В следующих далее уравнениях предполагается, что x_1 меньше расстояния между пластинами. Если $x_1 > d$, то уравнения следует изменить.

A, если не будет заметной рекомбинации. Ясно, что так оно и будет, поскольку в течение одного полупериода положительные носители проходят расстояние в направлении к пластине A большее, чем в течение другого полупериода по направлению к пластине B. Носители движутся взад и вперед в переменном электрическом поле, однако в целом они движутся к пластине A.

Полное число положительных носителей, образующихся между пластинами за полный период, равно $2dqT$. Следовательно, отношение ρ числа носителей, достигающих пластины B, к общему числу образующихся носителей, равно

$$\rho = \frac{{}^1\!/_2 x_1 qT + {}^1\!/_2 x_1 (x_1/x_2)\, qT}{2dqT} = \frac{1}{4}\,\frac{x_1}{d}\,\frac{x_1 + x_2}{x_2}\,.$$

Подставляя значения x_1 и x_2, получаем

$$K = \frac{2\,(E_0 + E_1)}{E_0\,(E_0 - E_1)}\,\frac{d^2}{T}\,\rho.$$

В экспериментах значения E_0, E_1, d и T варьировались, и полученные результаты в основном согласуются с приведенным уравнением.

§ 4. Скорость носителей возбужденной активности тория

В экспериментах с эманацией тория толстый слой окиси в неглубоком медном цилиндре помещался внутри эбонитовой коробочки сечением 11 *см*^{2} и глубиной 3 *см*, которая была плотно приклеена воском к металлическому основанию. Окись тория была покрыта сверху двумя листками фильтровальной бумаги, которая поглощала бóльшую часть прямого излучения, но пропускала эманацию.

Прибор можно было уплотнять с помощью металлической крышки, погруженной в воронку со ртутью, опоясывающую верхнюю часть эбонитовой коробочки. Перед началом эксперимента поверх бумаги, покрывающей окись тория, помещали квадратный листок алюминиевой фольги, поверх коробочки клали цинковую пластинку, а затем прибор уплотняли. Все проделывалось как можно быстрее, после чего включалось переменное электрическое поле.

Эманация быстро диффундировала через бумагу и тонкую алюминиевую фольгу и распределялась между пластинами в электрическом поле. По истечении промежутка времени, менявшегося в экспериментах от 20 до 90 *мин*, алюминиевую и цинковую пластинки вынимали и исследовали их радиоактивность обычным способом с помощью электрометра Долежалека.

Таким образом измерялось отношение величин возбужденной радиоактивности на обеих облучавшихся пластинках. Как оказалось, это отношение не зависит от времени, прошедшего между концом облучения

и измерением, так как радиоактивность на каждой пластинке распадается с одинаковой скоростью.

Количество окиси тория, использовавшегося в этих экспериментах, менялось от 25 до 100 *г*. Величина возбужденной активности при заданной длительности облучения изменялась с изменением количества окиси тория, однако отношение активностей пластинок оставалось неизменным. При заданном напряжении и частоте поля величина ρ была слегка больше, когда отрицательной была нижняя пластинка. Это объясняется неравномерным распределением эманации между пластинками. Вследствие конечной скорости диффузии концентрация эманации вблизи поверхности окиси тория больше. В качестве истинного значения ρ бралось среднее его значение, полученное в экспериментах, когда отрицательно заряженной была то верхняя, то нижняя пластина.

В первых экспериментах применялся двухсекторный коммутатор, приводившийся в движение мотором. В более поздних экспериментах для увеличения частоты переключения использовался четырехсекторный коммутатор.

С прибором такой конструкции было проделано большое количество экспериментов по проверке общей теории. Измерения скорости носителей были выполнены в широком диапазоне значений частоты переключения и напряжения поля при разных расстояниях между пластинами. Результаты в основном согласуются с выдвинутой теорией. При постоянном напряжении величина ρ уменьшается при увеличении частоты переключения поля. При постоянной частоте поля величина ρ увеличивается с напряжением.

При малых значениях ρ скорости носителей, вычисляемые из приведенного выше уравнения, оказываются слишком высокими и одна с другой не совпадают. Имеется несколько факторов, сильно влияющих на величину ρ при малых ρ. Эти факторы таковы:

1) *Рекомбинация и диффузия носителей.* В слабом электрическом поле носители рекомбинируют и рассеиваются на своем пути к электродам. Возбужденная радиоактивность в слабом поле изменяется как на положительном, так и на отрицательном электроде.

2) *Неоднородность электрического поля.* В этой простой теории мы предполагали, что градиент потенциала между пластинами постоянен; на самом деле это далеко не так. Эксперименты Чайлда и Зелени показали, что вблизи электродов всегда имеется резкий скачок потенциала. Следовательно, вблизи электродов напряженность электрического поля больше средней напряженности. Поэтому пластины B достигают лишь носители, выделяющиеся в очень тонком слое вблизи пластины B, а получающиеся при этом значения ρ приводят к значительно завышенным значениям скорости.

3) *Начальная скорость носителей.* По некоторым соображениям, которые будут рассмотрены ниже (см. § 9), кажется вполне вероятным, что положительный заряд носителя возникает тогда, когда нейтральная мо-

лекула испускает отрицательно заряженную частицу. Тем самым положительный носитель может приобрести достаточно большую начальную скорость, чтобы пройти некоторое расстояние против электрического поля. В результате этого эффекта даже в сильном электрическом поле на аноде возникает возбужденная активность. Эту точку зрения трудно подтвердить прямым экспериментом, однако вряд ли можно сомневаться в существовании этого эффекта.

Для получения согласующихся результатов оказалось необходимым, чтобы величина напряженности поля в течение одного полупериода значительно отличалась от его значения в течение другого полупериода, когда поле меняет направление. Если это различие мало, то носители движутся в направлении к пластине A столь медленно, что рекомбинация и рассеяние ионов начинают играть существенную роль в распределении возбужденной активности.

По причинам, которые объяснялись выше, в экспериментах необходимо было использовать довольно высокие напряжения и соответственно довольно большую скорость переключения поля.

В табл. 1 даны результаты, полученные для разных напряжений и при различных расстояниях между пластинами в атмосфере сухого воздуха при температуре 18° С.

Таблица 1

$E_0 + E_1$	$E_0 - E_1$	Частота переключения поля в 1 *сек*	ρ	K
Расстояние между пластинами 1,30 *см*				
75	50	57	0,17	1,7
152	101	57	0,27	1,25
225	150	57	0,38	1,17
300	200	57	0,44	1,24
Расстояние между пластинами 2 *см*				
273	207	44	0,37	1,47
300	200	53	0,286	1,45

Величина K дана в *см/сек* для градиента потенциала 1 *в/см*.

В последнем примере при вычислении скорости необходимо пользоваться уравнением в видоизмененной форме, так как в течение каждого полупериода носитель проходил расстояние больше 1,30 *см*.

Значение 1,6 *см/сек* при напряжении 50 *в* завышено по причинам, объясненным ранее.

Среднее значение скорости, полученное из большого количества измерений, проведенных при разных расстояниях между пластинами и различных напряжениях и скоростях переключения поля, равно 1,3 *см/сек* при атмосферном давлении и температуре.

Это значение близко к скорости положительных ионов, образующихся под действием лучей Рентгена и Беккереля. Наиболее точное измерение этой скорости, выполненное Зелени [7], дало значение 1,37 *см/сек* для сухого воздуха.

§ 5. Увеличение интенсивности возбужденных излучений со временем

В ходе этих экспериментов было обнаружено замечательное явление. Оказалось, что радиоактивность пластинки, облучавшейся недолгое время в присутствии эманации окиси тория, постепенно возрастает в течение нескольких часов после прекращения облучения. Увеличение зависит от времени облучения, но при кратковременном облучении радиоактивность возрастает в 3—4 раза по сравнению с первоначальным значением. При облучении в течение нескольких часов этот эффект не так заметен, а при выдержке сутки его вообще трудно обнаружить.

Ниже приведены полученные результаты:

1) Платиновая проволока, облучавшаяся в течение 15 *мин* в цилиндре с окисью тория при напряжении 110 *в*. Первое измерение проводили через 5 *мин* после удаления проволоки из цилиндра с эманацией:

Время, *мин*	0	7,5	24	43	58	78	99
Скорость разряда электрометра, деления шкалы в 1 *сек*	1,9	2,8	4,0	4,6	5,2	5,9	6,5

За 99 *мин* активность выросла более чем в 3 раза и еще не достигла максимума.

2) Алюминиевая фольга, служившая катодом в приборе с параллельными пластинами (см. рис. 1). Время облучения 41 *мин*, первое измерение проводили через 6 *мин* после удаления фольги из прибора.

Время, *мин*	0	21	31	57	70	91	120	160	180	22 *час*	49 *час*
Радиоактивность	1	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,9	2,9	2,9	1,0	0,21

Здесь для удобства сравнения начальное значение тока электрометра принято за единицу. Активность увеличивается в течение первых 2 *час* примерно в 3 раза по сравнению с первоначальным значением, а затем медленно спадает с обычной скоростью, т. е. уменьшается вдвое примерно за 11 *час*.

Аналогичные результаты были получены и в том случае, когда активность в пластинах возбуждалась без электрического поля. Возрастание активности со временем не зависит ни от материала электрода, ни от концентрации радиоактивного вещества на нем. Оказалось, что нагревание проволоки до красного каления тоже не влияет ни на скорость увеличения активности, ни на ее максимальную величину.

С увеличением времени, в течение которого электрод выдерживается в эманации тория, коэффициент увеличения активности электрода после его удаления уменьшается. При длительной экспозиции активность начинает уменьшаться сразу же после удаления образца. Такого результата следует ожидать, так как активность каждой порции радиоактивного вещества, попадающего на электрод, в течение 2—3 *час* увеличивается, а затем уменьшается. Поэтому при облучении в течение примерно 10 *час* или более возрастание активности вещества, выделившегося на поверхности в последние часы, не может скомпенсировать уменьшения активности всего радиоактивного вещества. Явление возрастания активности со временем объясняет непонятный ход кривой увеличения возбужденной активности тория в зависимости от времени облучения. В одной из предыдущих статей [8] указывалось, что если принять гипотезу о равномерной скорости осаждения радиоактивного вещества, активность которого распадается во времени по экспоненциальному закону, то кривая роста возбужденной активности во времени должна быть аналогична кривой нарастания электрического тока в контуре с постоянной индуктивностью. Экспериментально было обнаружено, однако, что скорость нарастания возбужденной активности в первые несколько часов была много меньше, чем следовало бы ожидать согласно этой гипотезе. В свете представленных результатов очень легко объяснить этот эффект. Вещество, осаждающееся в первые часы, не достигает своей максимальной активности в течение нескольких часов, поэтому начальный эффект много меньше ожидаемого из простой теории.

§ 6. Возбужденная активность радия

Для определения скорости носителей, ответственных за возбужденную активность радия, были проведены эксперименты, подобные проведенным для тория. Имевшийся в моем распоряжении радий в твердом виде при обычных температурах выделял слишком мало эманации и поэтому не мог быть использован в этом приборе вместо окиси тория. Однако количество выделяющейся эманации можно увеличить в несколько тысяч раз, нагревая соединение радия до температуры ниже температуры красного каления. Более удобен следующий способ получения большого количества эманации. Небольшое количество хлорида радия растворяют в воде. В растворе радий выделяет в несколько сотен раз больше эманации, чем в твердом состоянии. Если раствор находится в закрытом сосуде, то эманация непрерывно накапливается в верхней части этого сосуда. В любое время ее

можно перевести в другой сосуд, пропуская через раствор медленный поток воздуха. Для введения эманации в прибор мы придерживались следующей процедуры.

В металлический цилиндр объемом около 3 *л* вводили большое количество эманации. Испытуемые пластины устанавливали в приборе (см. рис. 1) и включали переменную э.д.с. С помощью боковых трубок прибор соединяли с сосудом, в котором находилась эманация. Под действием медленного потока воздуха небольшая часть эманации поступала в прибор. После этого соединительные трубки перекрывали и оставляли прибор под действием переменной э.д.с. в течение 15—30 *мин*. Перед остановкой коммутатора эманацию выдували из прибора медленной струей воздуха. Затем пластинки вынимали и их активность сравнивали с помощью электрометра. При сравнении интенсивности излучений от обеих пластинок возникли трудности с тем, что поначалу активность очень быстро спадает. Как показано в работе [5], возбужденная активность радия при коротких экспозициях быстро уменьшается в течение первых 5 *мин* после удаления образца, а спустя примерно 15 *мин* достигает значения, которое поддерживается довольно постоянным приблизительно 10 *мин*. После этого активность спадает до нуля, уменьшаясь вдвое за время, равное приблизительно 30 *мин*. Сравнение активности обеих пластинок производилось тогда, когда активность выходила на постоянный уровень.

В экспериментах, проводившихся при тех же условиях, что и в случае тория, были получены довольно высокие значения скорости носителей, причем цифры, полученные для различных частот и напряжений, значительно различаются между собой. Выяснено, что эти несовпадения обусловлены тем, что даже в сильном электрическом поле 5—10% общей возбужденной активности распределяется на аноде. В этом отношении активность, возбуждаемая радием, отличается от возбужденной активности тория. Поэтому значение ρ в эксперименте с радием будет больше, чем при тех же условиях с торием, даже если носитель возбужденной активности в обоих случаях движется с одинаковой скоростью.

§ 7. Распределение возбужденной активности на аноде

Чтобы выяснить причину такого распределения возбужденной активности на аноде, был проделан ряд экспериментов с прибором, изображенным на рис. 2, *а*.

Сосуд *A* с эманацией представлял собой латунный цилиндр длиной 25,5 *см* и диаметром 8,30 *см*. Длинный центральный стержень *BCDE* диаметром 0,518 *см* проходил через эбонитовую пробку, расположенную на одном из концов трубы. Внешний цилиндр соединялся с полюсом большой батареи, другой полюс был заземлен. Центральный стержень заземлялся. Эманация поступала в сосуд под действием медленного потока воздуха, проходившего через раствор хлорида радия, находившегося в склянке Дрекселя *F*. Воздух проходил через трубку с ватой и через

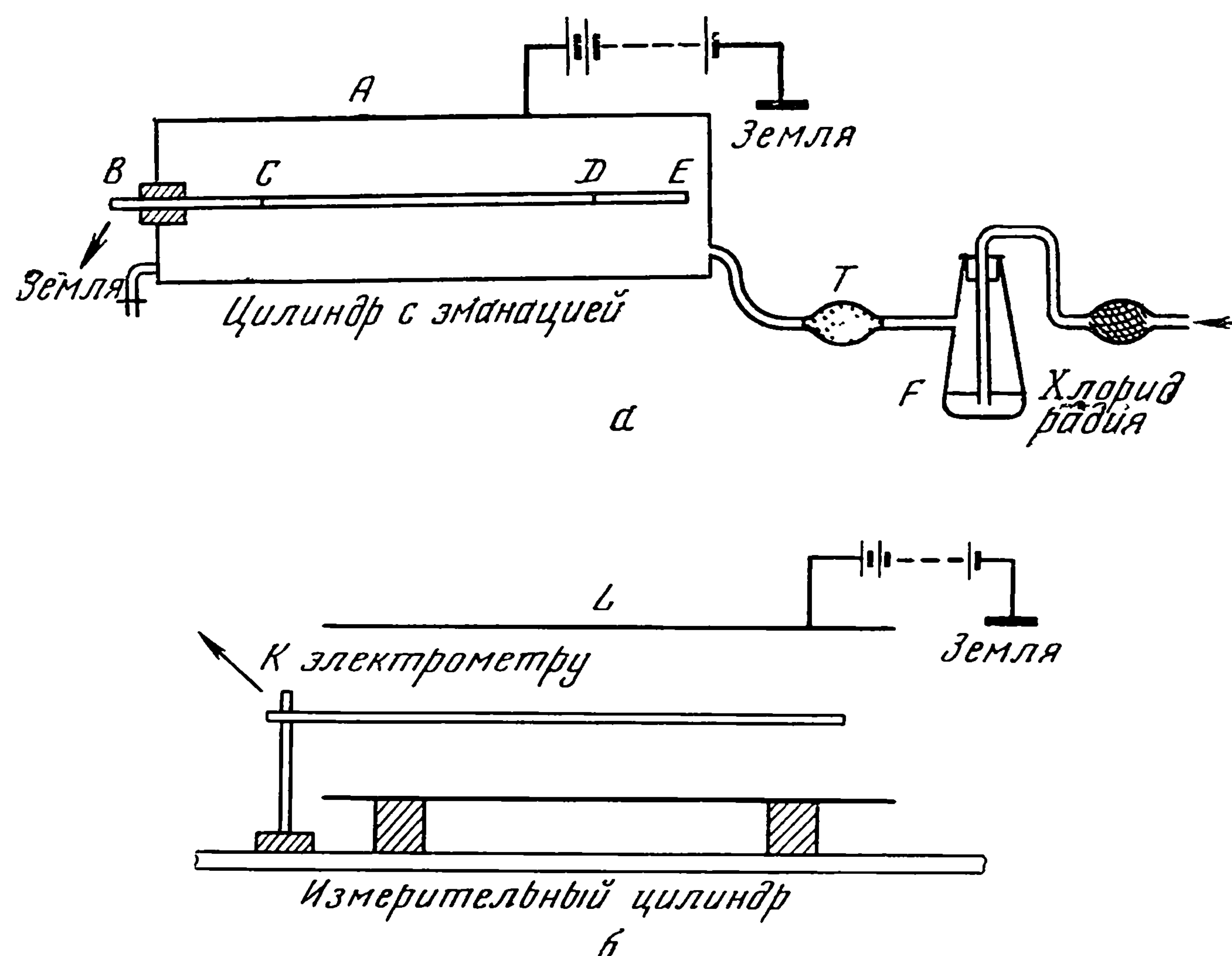


Рис. 2

осушительную трубку T с хлоридом кальция. Центральный стержень был сделан из трех отдельных частей BC, CD и DE, свинченных вместе. В течение известного времени стержень выдерживали в присутствии эманации, после чего вынимали участок CD длиной 15 *см* и помещали в измерительный сосуд L, изображенный на рис. 2, *б*. Его активность измерялась с помощью электрометра. Этим способом измерялась возбужденная активность того участка стержня, где электрическое поле было достаточно однородным.

В большинстве экспериментов эманацию вводили в сосуд A за день или за два до измерений. Это обеспечивало равномерное распределение эманации по объему цилиндра вследствие диффузии. Если требовалось провести опыт вскоре после поступления эманации, ее перемешивали с воздухом с помощью мешалки, которая на рисунке не показана.

С этим прибором были выполнены эксперименты по измерению величины возбужденной активности на центральном стержне, когда он заряжен положительно при различных напряжениях. Для удобства сравнения результаты выражены в процентах от величины активности такого же электрода, облучавшегося в течение того же времени при напряжении 300 *в*, когда стержень был заряжен отрицательно. Стержень выдерживали в присутствии эманации в течение 15 *мин*, а затем удаляли и вставляли новый стержень. В ходе 3—4 *час* работы величина возбужденной активности, получаемой при заданном времени экспозиции, уменьшалась примерно на 20%. Частично это обусловлено уменьшением эманации за указанный интервал времени, частично — небольшой утечкой эманации при

удалении и замене центрального стержня. При определении отношения возбужденной активности в начале и в конце эксперимента легко можно было сделать поправку на это уменьшение.

Ниже приведена возбужденная активность на аноде (диаметр 8,3 *мм*):

Напряжение, *в*	—300	+300	+150	+50	+20	0
Активность, %	100	6	6	9	10	14

Из этих данных видно, что величина активности на электроде при напряжении +300 *в* составляет 6% от величины активности при напряжении —300 *в*. При уменьшении напряжения активность возрастала, достигая 14% при напряжении, равном нулю, когда появление активности обусловлено только диффузией носителей к центральному электроду. Чтобы выяснить, какая доля активности на электроде обусловлена переносом в электрическом поле, а какая — диффузией, эти эксперименты повторили с центральным стержнем, диаметр которого был не 8,3 *мм*, а 0,8 *мм*:

Напряжение, *в*	—300	+300	+50
Активность, %	100	4	7

Очевидно, что для этого центрального стержня, площадь поверхности которого уменьшилась в 10 раз, влияние диффузии должно очень сильно уменьшиться. Таким образом, из этих опытов можно заключить, что часть возбужденной активности радия (около 5%) переносится на положительный электрод в электрическом поле и, следовательно, носители должны иметь отрицательный заряд.

Был поставлен специальный эксперимент по измерению величины возбужденной активности радия в приборе с параллельными пластинами. Для этого использовали сосуд с эманацией (см. рис. 1), расстояние между пластинами составляло 1,3 *см*. При напряжении между пластинами 300 *в* на аноде сосредоточивалось около 10% всей активности. Из предыдущих экспериментов мы видели, что около 5% носителей достигает анода за счет переноса в электрическом поле. Следовательно, остальные 5% должны переноситься на анод другими носителями. При таком сильном поле эффект, обусловленный диффузией, должен быть очень мал. Поэтому кажется вероятным, что некоторые радиоактивные носители имеют достаточно большую начальную скорость, чтобы попасть на электрод, двигаясь против электрического поля.

§ 8. Скорость носителей

Были проделаны эксперименты по определению скорости носителя возбужденной радиоактивности с использованием концентрических цилиндров (см. рис. 2,*а*). Если через a и b обозначить радиусы внутреннего стержня и цилиндра, то напряженность электрического поля X на рас-

стоянии r от оси при разности потенциалов между цилиндрами V *в* дается формулой

$$X = \frac{V}{r \ln (b/a)}.$$

Можно показать, что скорость K носителя возбужденной радиоактивности (обозначения и предположения те же, что и в случае параллельных пластин) дается формулой

$$K = \frac{E_0 + E_1}{E_0 (E_0 - E_1)} \frac{(b^2 - a^2) \ln (b/a)}{T} \rho.$$

В табл. 2 представлены результаты, полученные для различных скоростей переключения и при разных напряжениях.

Таблица 2

$E_0 - E_1$	$E_0 + E_1$	Частота переключений в 1 *сек*	ρ	Скорректированное значение ρ	K
205	308	5,7	0,35	0,32	1,0
205	308	11,2	0,24	0,20	1,2
205	308	17,2	0,19	0,13	1,2
205	308	34	0,16	?	
385	580	18,3	0,30	0,27	1,5
385	580	47	0,16	?	

Значения скорости носителя, вычисленные на основе *нескорректированных* значений ρ, очень сильно отличаются. Видно, однако, что величина ρ возрастает при уменьшении частоты переключений и при увеличении напряжения, как и следует ожидать из элементарной теории. Уменьшить наблюдаемое значение ρ ниже 0,16 оказалось невозможным ни снижением напряжения, ни увеличением частоты переключения. Этого и следует ожидать, так как выше мы показали, что возбужденная активность на центральном стержне, обусловленная только одной диффузией, составляет 0,14 от общей активности. Поэтому в тех случаях, когда носитель в течение полупериода перемещается на расстояние, малое по сравнению с расстоянием между пластинами, только небольшая часть возбужденной активности на центральном стержне обусловлена положительно заряженными носителями, движущимися под действием электрического поля. Бóльшая часть активности обусловливается диффузией носителей к этому электроду и теми носителями, которые попадают на него, когда центральный стержень служит анодом. Количество последних носителей, как мы показали, составляет 5% от общего количества, поэтому можно сделать лишь грубую оценку величины возбужденной активности на этом электроде

для различных случаев. По этим причинам скорректированные значения ρ в табл. 2 для частот 34 и 47 *сек*$^{-1}$ составляют, по-видимому, не более $^1/_3$ от наблюдавшегося значения 0,16.

В таблице для некоторых значений ρ введена грубая поправка и вычислена получающаяся в результате этого скорость. Видно, что значения скорости носителей лежат в пределах от 1,0 до 1,5 *см/сек* при градиенте потенциала 1 *в/см*. Это примерно тот же диапазон значений, что и в случае носителей возбужденной активности тория.

Из этих результатов нельзя однозначно заключить, движутся ли носители возбужденной активности тория и радия точно с одинаковой скоростью. Однако эти результаты показывают, что скорости носителей в обоих случаях различаются не очень сильно, а следовательно, носители мало различаются и по размеру.

Из этих экспериментов можно сделать вывод, что бо́льшая часть возбужденной радиоактивности соединений тория и радия обусловлена выделением на катоде положительно заряженных носителей, образующихся из эманаций, и что эти носители движутся примерно с той же скоростью, что и положительные ионы, образующиеся в воздухе под действием лучей Рентгена.

В отсутствие электрического поля возбужденная радиоактивность переносится за счет диффузии этих носителей к поверхности всех тел, находящихся в эманации.

§ 9. Происхождение носителей

Прежде чем обсуждать вопрос о механизме образования этих положительных носителей, необходимо дать краткий обзор физических свойств эманаций тория и радия. Прежде всего следует сказать, что эманации во всех отношениях ведут себя подобно радиоактивным газам с большим молекулярным весом. Они не имеют никакого электрического заряда и, следовательно, не реагируют на присутствие электрического поля.

В своей первой статье, посвященной эманации тория, я указывал, что частицы, из которых состоит эта эманация, движутся со скоростью, определенно не превышающей 0,00001 *см/сек* при градиенте 1 *в/см*. На основе этого был сделан вывод, что в исходном состоянии эманация сама по себе электрически нейтральна. Аналогичный результат справедлив и для эманации радия, так как она продолжает существовать в замкнутом сосуде после пребывания в течение нескольких недель в сильном электрическом поле. По этим причинам выдвинутое Беккерелем предположение [9], что эманации состоят из положительных ионов, непосредственно испускаемых радиоактивными телами, несостоятельно, ибо в этом случае ионы сразу же устремились бы под действием электрического поля к электродам и очень быстро исчезли бы из газа.

Эманации обладают свойством ионизовать газ и образовывать положительно заряженные носители, которые, попадая на окружающие тела,

вызывают в них возбужденную активность. Эманация тория сохраняет это свойство всего лишь несколько минут, а эманация радия — несколько недель.

Можно выдвинуть две гипотезы, объясняющие происхождение этих заряженных носителей:

1) радиоактивное вещество, из которого состоит эманация, конденсируется на положительных ионах, образующихся в газе под действием радиации, и таким образом переносится на катод;

2) частицы эманации обладают свойством испускать какую-то отрицательно заряженную частицу. В результате они получают положительный заряд и движутся к катоду под действием электрического поля.

Не легко сделать окончательный выбор между этими двумя гипотезами, однако данные в целом неоспоримо говорят в пользу второй.

В отношении первой гипотезы можно предположить, что эманация конденсируется преимущественно на положительных ионах; следует отметить, что пары воды и спирта легче конденсируются на отрицательных ионах, нежели на положительных. Но если бы это было так, то следовало бы ожидать, что количество эманации начнет убывать быстрее, если возрастет число ионов в газе, в котором эманация находится. Никаких доказательств существования такого эффекта не имеется. Я пытался провести эксперимент, пропуская эманацию через пространство, сильно ионизованное лучами радия, однако величина возбужденной активности, образовавшейся за определенное время на катоде, помещенном в этом пространстве, изменилась несущественно. Я пытался также экспериментально исследовать влияние сильного электрического поля на излучение эманации, но результаты опять оказались отрицательными. Для этой цели на дно небольшой свинцовой коробочки помещался торий, который был покрыт двумя слоями бумаги для поглощения прямого излучения. Сверху коробочка плотно закрывалась очень тонким листком слюды, что предотвращало утечку эманации и в то же время позволяло излучению от эманации проходить наружу и ионизовать газ над сосудом. Воздействие на эманацию сильного электрического поля, создававшегося заряженными изолированными проводниками, помещаемыми в сосуд, не изменяло величину этой ионизации вне сосуда.

Если эманация перемещается на катод в электрическом поле за счет конденсации на ионах, то следовало бы ожидать, что она будет продолжать излучать, пребывая на электроде, так же, как и в газе. С этой точки зрения излучение с катода после его удаления из эманации должно быстро уменьшаться за несколько минут. Специальные эксперименты, предпринятые для проверки этого эффекта, не показали никакого уменьшения излучения, хотя аппаратура позволяла легко обнаружить падение активности даже в течение 1 *мин*.

Таким образом, имеются существенные косвенные данные против гипотезы конденсации, поэтому от нее следует отказаться в пользу второй гипотезы, которая позволяет дать удовлетворительное объяснение не

только образованию положительных носителей, но и происхождению излучения самой эманации. С точки зрения этой гипотезы эманация состоит из вещества, находящегося в нестабильном состоянии и претерпевающего дальнейшее химическое превращение. Это превращение заключается в том, что нейтральная молекула испускает отрицательную частицу. Остающаяся часть молекулы приобретает положительный заряд и сразу же начинает свое движение в электрическом поле по направлению к катоду. Это вещество снова претерпевает химическое превращение, что и обусловливает явление возбужденной радиоактивности. Экспериментальные данные, подтверждающие эту точку зрения, рассматриваются в § 10, посвященном природе излучений.

Выше было показано, что носители возбужденной активности как тория, так и радия, движутся примерно с той же скоростью, что и ионы, образующиеся в воздухе под действием лучей Рентгена. Из кинетической теории газов следует, что ионы в воздухе, по-видимому, имеют бóльшие размеры по сравнению с молекулой кислорода или водорода. Это можно объяснить тем, что ион непосредственно после своего образования становится центром скопления молекул, движущихся вместе с ним. С этой точки зрения часть молекулы эманации, которая получила положительный заряд, сразу же становится ядром большого скопления молекул окружающего газа. Размер этого сгустка, по-видимому, такой же, как у положительного иона, так как он определяется главным образом величиной электрического заряда, который одинаков в обоих случаях. Таким образом, скорость движения носителей возбужденной активности и ионов газа в электрическом поле получается одинаковой. Поскольку размер сгустка велик по сравнению с размерами первоначального ядра, то скорость носителей возбужденной активности тория и радия будет примерно одинаковой, даже если первоначальные ядра имели разные массы.

§ 10. Природа излучений

При рассмотрении вопроса о размерах частицы, вылетающей из молекулы эманации, и о природе излучения, испускаемого эманацией, необходимо принять во внимание происхождение эманаций, выделяемых всеми известными радиоактивными телами. Нет причин считать, что процессы, происходящие в молекуле эманации, существенно отличаются по своему характеру от процессов, протекающих в других радиоактивных телах. Известно, что уран, торий и радий испускают излучение двух типов. Излучение первого типа слабо отклоняется в магнитном и электрическом полях и очень сильно поглощается веществом. Мы будем называть его α-лучами. Излучение второго типа можно отклонять полем, оно имеет бóльшую проникающую способность; мы будем называть его β-лучами. Кроме этого, я показал, что торий и радий испускают лучи, которые вовсе не отклоняются и обладают очень большой проникающей способностью. Все радиоактивные вещества, включая полоний, а также «возбужденные»

тела и эманации испускают α-лучи. Способность этих лучей ионизовать газ во много раз больше, чем у лучей других типов. По-видимому, бóльшая часть энергии, излученной в газ в виде радиации, заключена в α-лучах. Испускаемые различными радиоактивными веществами (включая эманации «возбужденных» тел) α-лучи не очень сильно различаются между собой по проникающей способности. «Возбужденные» излучения тория и радия — наиболее проникающие, а излучение урана — наименее проникающее.

Было трудно дать удовлетворительное объяснение происхождению этих лучей. Ранее я показал несостоятельность той точки зрения, что α-лучи есть вторичные лучи, которые вызываются испусканием β-лучей. Многочисленные косвенные доказательства заставили меня в последнее время прийти к заключению, что α-лучи в действительности представляют собой заряженные частицы, вылетающие с большой скоростью. Ионизующее действие этих лучей обусловливается столкновением этих частиц с молекулами газа точно так же, как катодные лучи на своем пути ионизуют газ. Такая частица, по-видимому, на своем пути создает много тысяч ионов, прежде чем ее скорость упадет до значения, ниже которого ионизация газа невозможна. Стрэтт выдвинул гипотезу, что α-лучи представляют собой положительно заряженные частицы, поскольку β-лучи, испускаемые тем же телом, имеют отрицательный заряд. Эта же точка зрения была выдвинута недавно Круксом.

Данные, указывающие на корпускулярный характер α-лучей, носят пока косвенный характер и кратко могут быть сформулированы следующим образом:

1) Поглощение α-лучей веществом (как и β-лучей, которые, как нам известно, представляют собой движущиеся частицы) примерно пропорционально плотности материала. Было показано, что поглощение лучей урана, тория и радия в воздухе и алюминии приблизительно пропорционально их плотности.

2) При заданной плотности вещества поглощение α-лучей быстро возрастает с толщиной пройденного материала.

Я обнаружил, что таково общее свойство α-лучей не только чистых радиоактивных элементов, но и α-лучей, испускаемых эманацией и возбужденными телами. Этого следовало ждать, поскольку лучи состоят из движущихся частиц, но трудно объяснить, если эти лучи — волны эфира, подобно лучам Рентгена.

3) В случае эманаций мы имеем непосредственные доказательства испускания отрицательно заряженной частицы [1]. Эти частицы, ионизую-

---

[1] Вначале я был склонен полагать, что частица, испускаемая эманацией, представляет собой отрицательный электрон, так как известно, что соединения тория и радия, а также возбужденные ими тела испускают отклоняемые лучи. Однако с помощью электрического метода я провел тщательное исследование излучения эманации и не обнаружил присутствия проникающих отклоняемых лучей. Если такие отклоняемые лучи и присутствуют, то наверняка их значительно меньше по сравнению с α-лучами, чем в излучении других радиоактивных веществ.

щие газ на своем пути, и представляют собой излучение эманации. Это удовлетворительным образом объясняет экспериментальный факт, заключающийся в том, что величина возбужденной активности прямо пропорциональна интенсивности излучения эманации. Этим же можно объяснить тот факт, особенно заметный в опытах с эманацией радия, что некоторые носители возбужденной активности имеют достаточно большую начальную скорость, чтобы двигаться против электрического поля. Эта скорость обусловлена энергией отдачи, возникающей при испускании заряженной частицы.

Если эти лучи представляют собой вылетевшие заряженные частицы, то они должны обладать также свойствами α-лучей, т. е. отклоняться в магнитном и электрическом полях.

Пока отклонение α-лучей в сильном магнитном поле не обнаружено, но эксперименты еще не доведены до необходимой завершенности. Однако полученные результаты показывают, что если эти лучи отклоняются, то отклонение это ничтожно по сравнению с отклонением β-лучей. Этого следует ожидать, если масса испускаемой частицы велика по сравнению с массой электрона. Например, если масса испущенной частицы в 10 раз больше массы атома водорода, то для получения отклонения, равного отклонению электрона, движущегося с такой же скоростью, потребуется в 10 000 раз более сильное магнитное поле. Имеются данные, что в вакуумных трубках образуются большие носители, движущиеся с высокой скоростью. Вин показал [10], что «каналовы лучи» Гольдштейна представляют собой положительно заряженные частицы, движущиеся с большой скоростью. Эти лучи отклоняются магнитным и электрическим полями. Если вакуумная трубка заполнена водородом, то отношение e/m заряда к массе этих носителей составляет примерно 10^4. Это показывает, что носители имеют ту же массу, что и атом водорода. В атмосфере кислорода эти носители значительно больше атома водорода.

Возможно, что в разных условиях электрический заряд испущенной частицы для разных радиоактивных тел различен. Испущенные эманациями тория и радия частицы большей частью отрицательны. Обнаружено, что некоторые носители возбужденной активности радия имеют отрицательный заряд, т. е. испускаемые частицы положительны. Дорн показал также, что в растворе радия возбужденная активность возникает на аноде, а не на катоде. Это говорит о том, что носители возбужденной активности имеют в растворе отрицательный заряд, так что испускаемая частица положительна.

§ 11. Химические превращения радиоактивных веществ

В нашей работе с Содди мы выдвинули гипотезу, что радиоактивность представляет собой процесс, сопровождающий непрерывное химическое превращение. Рассмотрим для примера торий — наиболее изученный радиоактивный материал. Известно, что из соединения тория образуется

с постоянной скоростью химическое вещество ThX. Это вещество претерпевает в дальнейшем химическое превращение, одним из продуктов которого является эманация. Сама по себе эманация нестабильна и испускает отрицательно заряженную частицу. Оставшаяся положительно заряженная часть эманации переносится на электроды и там снова претерпевает химическое превращение, которое обусловливает явление возбужденной радиоактивности.

Таким образом, имеются данные о существовании четырех различных превращений, в каждом из которых образуется вещество, обладающее отличительными химическими свойствами. Так, ThX растворяется в аммиаке, тогда как сам торий и продукты его более поздних превращений в аммиаке нерастворимы. В отличие от вещества, вызывающего возбужденную радиоактивность, эманация не растворяется ни в соляной, ни в серной кислотах. Кроме того, имеются убедительные доказательства того, что химические превращения в веществе, ответственном за возбужденную радиоактивность, имеют сложный характер. Показано, что возбужденное излучение тела после удаления его из эманации, где оно выдерживалось в течение недолгого времени, возрастает. Этот эффект аналогичен увеличению радиоактивности ThX в течение первого дня после отделения, которое, как было показано, обусловлено возбужденной активностью, образующейся в веществе, из которого состоит ThX.

Чтобы объяснить увеличение радиоактивности после удаления образца из эманации, следует предположить, что вещество, выделяющееся из эманации тория, постепенно испытывает химическое превращение. Образовавшееся новое вещество претерпевает вторичное превращение, которое происходит медленнее, чем первичное, но вызывает бóльшую радиоактивность. Из данных § 5 следует, что примерно через час после осаждения половина вещества претерпевает превращение, тогда как соответствующее время для вторичного превращения составляет 11 *час*.

§ 12. Основные результаты

1. Возбужденная активность, вызываемая соединениями тория и радия, обусловлена осаждением радиоактивного вещества, которое порождает эманация, выделяемая этими соединениями.

2. Возбужденная активность переносится образующимися из эманации положительно заряженными носителями, которые движутся в электрическом поле примерно с той же скоростью, что и положительные ионы, возникающие в воздухе под действием лучей Рентгена. Эта скорость (около 1,3 *см/сек* при напряженности поля 1 *в/см*) примерно одинакова для носителей возбужденной активности тория и радия.

3. Эти положительно заряженные носители возникают при испускании молекулой эманации отрицательно заряженной частицы.

4. Приводятся данные, подтверждающие гипотезу, что легко поглощаемые, а также, по-видимому, неотклоняемые лучи радиоактивного ве-

щества обусловлены испусканием заряженных тел, обладающих большой скоростью. Таким образом, эти лучи аналогичны «каналовым лучам» Гольдштейна, которые, как показал Вин, представляют собой положительно заряженные частицы, движущиеся с большой скоростью.

Испускаемые эманациями частицы большей частью имеют отрицательный знак.

5. В присутствии сильного электрического поля около 5% носителей радия выделяются на аноде.

6. Возбужденное излучение тория при кратковременном облучении в присутствии эманации в течение нескольких часов после удаления образца из эманации возрастает в 3—4 раза по сравнению с первоначальным значением.

7. Эманации и вещество, вызывающие возбужденную активность, появляются в результате последовательности химических превращений, протекающих в радиоактивном веществе. Имеются данные, что торий претерпевает по крайней мере четыре различных химических превращения.

Мак-Гиллский университет, Монреаль,
29 июля 1902 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rutherford E.* Phil. Mag., January, 1900.
2. *Rutherford E.*, *Soddy F.* Phil. Mag., September, 1902.
3. *Rutherford E.* Nature, 1901, 157.
4. *Rutherford E.* Proc. Roy. Soc. Canada, 1901.
5. *Rutherford E.*, *Brooks G.* Phil. Mag., July, 1902, 18.
6. *Rutherford E.* Proc. Cambridge Philos. Soc., 1897.
7. *Zeleny J.* Phil. Trans. Roy. Soc., 1900.
8. *Rutherford E.* Phil. Mag., February, 1900, 178.
9. *Becquerel A.* Compt. Rend., December, 9, 1901.
10. *Wien W.* Drude's Ann., 1902, N 6, 244.

ОТКЛОНЕНИЕ ЛЕГКО ПОГЛОЩАЕМЫХ ЛУЧЕЙ РАДИЯ В МАГНИТНОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЯХ *

Радий испускает излучение трех различных видов:

1) α-лучи, которые легко поглощаются тонкими слоями вещества и вносят наибольший вклад в ионизацию газа, наблюдающуюся в обычных экспериментальных условиях;

2) β-лучи — отрицательно заряженные частицы, вылетающие с большой скоростью, во всех отношениях подобные катодным лучам, получающимся в вакуумной трубке;

3) γ-лучи, которые не отклоняются магнитным полем и обладают очень большой проникающей способностью.

Все эти лучи сильно различаются между собой по своей способности проходить через вещество. Приведенные ниже примерные значения толщины слоя алюминия, при прохождении которого интенсивность излучения уменьшается вдвое, наглядно иллюстрируют это различие:

Излучение	Толщина алюминия, *см*
α-лучи	0,0005
β-лучи	0,05
γ-лучи	8

В этой статье будут описаны некоторые эксперименты, показывающие, что α-лучи отклоняются в сильных магнитном и электрическом полях. Эти лучи отклоняются в противоположную по сравнению с катодными лучами сторону и, следовательно, должны состоять из положительно заряженных частиц, движущихся с большой скоростью. В предыдущей работе [1] я привел результаты экспериментов, косвенно подтверждающие ту точку зрения, что α-лучи — это поток заряженных частиц [1]. Предварительные эксперименты последних двух лет, предпринятые для решения этого вопроса, дали отрицательные результаты. Даже в сильном магнитном поле отклонение настолько мало, что необходимы специальные методы для его обнаружения и измерения. О чрезвычайно малом отклонении

* Philosophical Magazine, February, 1903, ser. 6, 5, 177—187.

[1] Стрэтт давно выдвинул предположение [2], что α-лучи состоят из положительно заряженных частиц, испускаемых активным веществом. Та же идея была позднее выдвинута Круксом [3].

α-лучей магнитным полем по сравнению с отклонением катодных лучей в вакуумной трубке можно судить хотя бы по тому, что α-лучи, направленные под прямым углом к магнитному полю с напряженностью, равной 10 000 *эл.-стат. ед.*, описывают дугу окружности с радиусом около 39 *см*, тогда как катодные лучи в этих условиях описывали бы окружность с радиусом около 0,01 *см*.

В первых опытах использовался радий с активностью 1000, однако интенсивность лучей была недостаточной для проведения эксперимента. Обычно в этих экспериментах применялся следующий метод: лучи пропускали через узкие щели и наблюдали, изменяется ли скорость разряда, вызываемого прошедшими лучами, при наложении магнитного поля. Однако при прохождении α-лучей через щели, достаточно узкие, чтобы обнаружить малое отклонение, скорость разряда, вызываемого прошедшими лучами, уменьшалась настолько, что не поддавалась измерению даже чувствительным электрометром.

Недавно я получил образец радия с активностью 19 000[1]. Использование электроскопа вместо электрометра позволило мне продолжить эксперименты и показать, что все α-лучи отклоняются сильным магнитным полем.

Отклонение лучей в магнитном поле

На рис. 1, *а* показана общая схема экспериментальной установки. Лучи, испускаемые тонким слоем радия, проходили вверх через ряд параллельных узких щелей *G*, а затем через тонкую алюминиевую фольгу толщиной 0,00034 *см* попадали в измерительный сосуд *V*. Ионизация, производимая лучами в измерительном сосуде, измерялась по скорости движения золотого листочка в электроскопе *B*, который был устроен так же, как электроскоп в опытах Ч. Т. Р. Вильсона по спонтанной ионизации воздуха. Золотой листок внутри сосуда был изолирован с помощью бусинки из серы *C* и мог заряжаться посредством подвижной проволоки *D*, которая после этого заземлялась. Движение золотого листочка наблюдалось с помощью микроскопа через маленькие слюдяные окошки в измерительном сосуде.

Чтобы увеличить ионизацию в измерительном сосуде, лучи пропускали через 20—25 щелей одинаковой ширины, расположенных одна возле другой. Щели были образованы латунными пластинками, вставленными в канавки, прорезанные на разных расстояниях в боковых пластинах. Поперечное сечение этой системы металлических пластин и воздушных промежутков показано на рис. 1, *б*.

Ширина щелей в разных экспериментах варьировалась от 0,042 до 0,1 *см*.

---

[1] Образец радия с активностью большей, чем у обычно имеющихся в продаже препаратов, был нам предоставлен Центральным обществом химических продуктов благодаря любезному содействию П. Кюри.

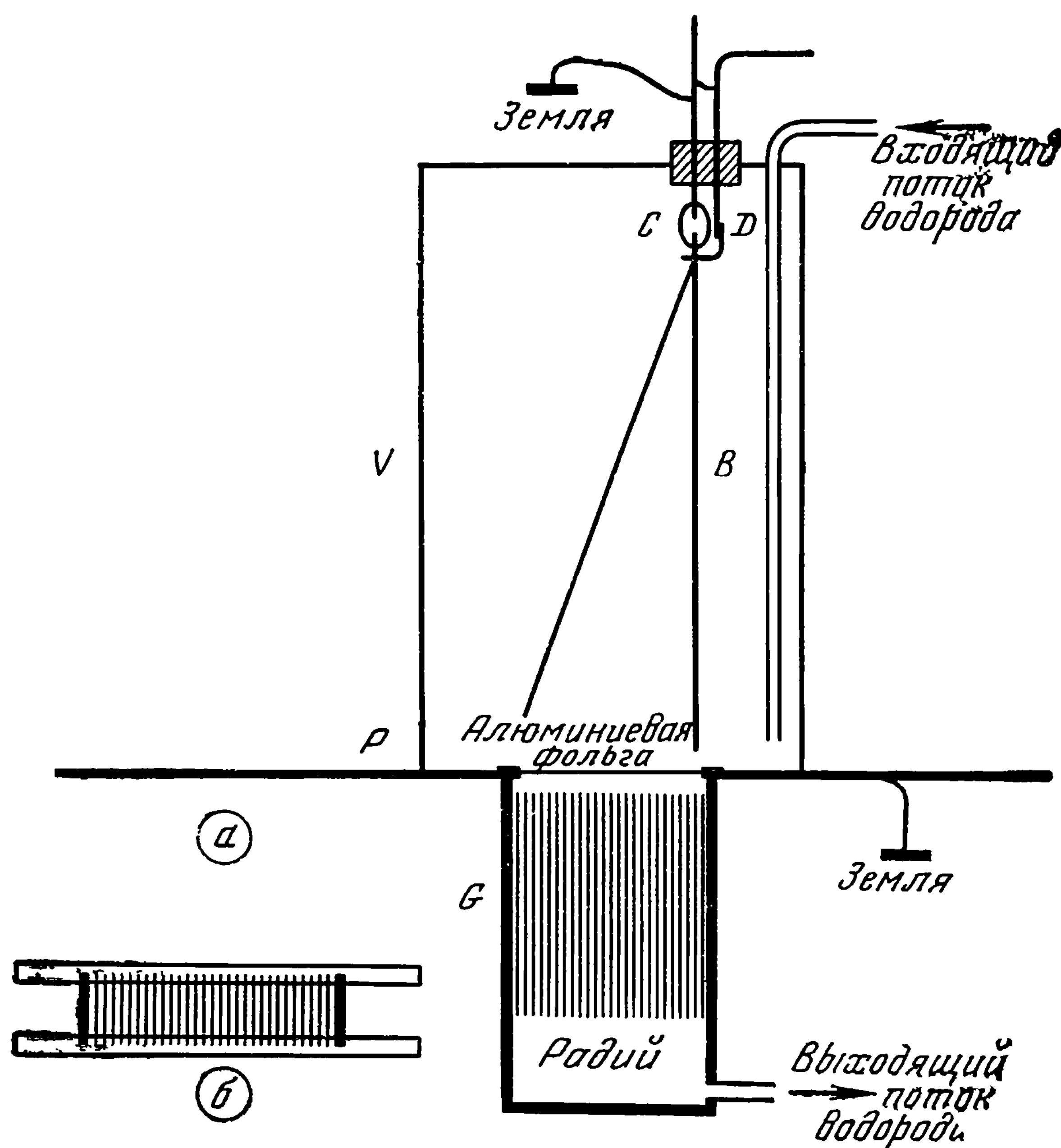


Рис. 1

Магнитное поле прикладывалось перпендикулярно плоскости чертежа и параллельно плоскости щелей.

Измерительный сосуд и система пластинок были приклеены воском к свинцовой пластине P так, что лучи попадали в сосуд V только через алюминиевую фольгу.

В этих опытах необходим постоянный поток газа, движущийся вниз между пластинками, чтобы воспрепятствовать диффузии эманации радия вверх в измерительный сосуд. Присутствие в измерительном сосуде небольшого количества эманации, которая образуется радием, привело бы к большой ионизации и полностью маскировало бы изучаемый эффект.

Для этой цели в измерительный сосуд впускали постоянный поток сухого электролизного водорода, который проходил со скоростью 2 *см*^{3}/*сек* через пористую алюминиевую фольгу и двигался между пластинками, унося с собой эманацию из прибора.

Использование водорода вместо воздуха значительно облегчает эксперимент, так как водород *увеличивает* ионизационный ток в измерительном сосуде, обусловленный α-лучами, и одновременно *уменьшает* ток, обязанный β- и γ-лучам.

Вызвано это тем, что α-лучи поглощаются воздухом значительно сильнее, чем водородом, тогда как скорость образования ионов β- и γ-лучами

в водороде много меньше, чем в воздухе. Следовательно, интенсивность α-лучей после прохождения их между пластинами при использовании водорода больше, а поскольку в измерительном сосуде они проходят в водороде такое расстояние, что успевают в значительной степени поглотиться, то общая ионизация, производимая ими в водороде, больше, чем в воздухе.

С помощью самого большого в нашей лаборатории электромагнита мне удалось отклонить только около 30% α-лучей. Однако, благодаря любезности профессора электротехнического факультета Оуэнса, я получил возможность использовать верхнюю часть магнита от 30-киловаттной динамомашины Эдисона. Сейчас изготавливаются подходящие полюсные наконечники для получения сильного магнитного поля в значительном объеме; однако и с простыми полюсами мне удалось получить достаточно сильное поле, чтобы полностью отклонить α-лучи.

Ниже приведены данные одного из наблюдений по отклонению α-лучей в магнитном поле:

Полюсные наконечники	1,90×2,50 *см*
Напряженность поля между полюсами	8370 *эл.-стат. ед.*

Прибор состоял из 25 параллельных пластинок длиной 3,70 *см*, шириной 0,70 *см*, со средней шириной воздушного промежутка между пластинами 0,42 *см*.

Расстояние между радием и нижними краями пластин 1,4 *см*:

	Скорость разряда электроскопа, *в/мин*
1) Без магнитного поля	8,33
2) С магнитным полем	1,72
3) Радий покрыт тонким слоем слюды, поглощающим все α-лучи	0,93
4) Радий покрыт слюдой и приложено магнитное поле	0,92

Слюдяная пластинка толщиной 0,01 *см* полностью поглощала все α-лучи, но пропускала β- и γ-лучи без существенного ослабления. Разница между измерениями 1) и 3), равная 7,40 *в/мин*, дает скорость разряда, обусловленного только α-лучами; разница между измерениями 2) и 3), равная 0,79 *в/мин*, обязана α-лучам, не отклонившимся в магнитном поле.

Количество α-лучей, не отклоненных магнитным полем, составляет, таким образом, около 11% от общего количества. Небольшая разница между измерениями 3) и 4) обусловлена слабой ионизацией, вызываемой β-лучами, которые полностью отклоняются магнитным полем. Возможно, что ионизация, вызываемая β-лучами без магнитного поля, в действительности больше, чем указано; однако остаточное магнитное поле при выключении тока магнита достаточно велико, чтобы полностью отклонить β-лучи прежде, чем они достигнут измерительного сосуда. В ре-

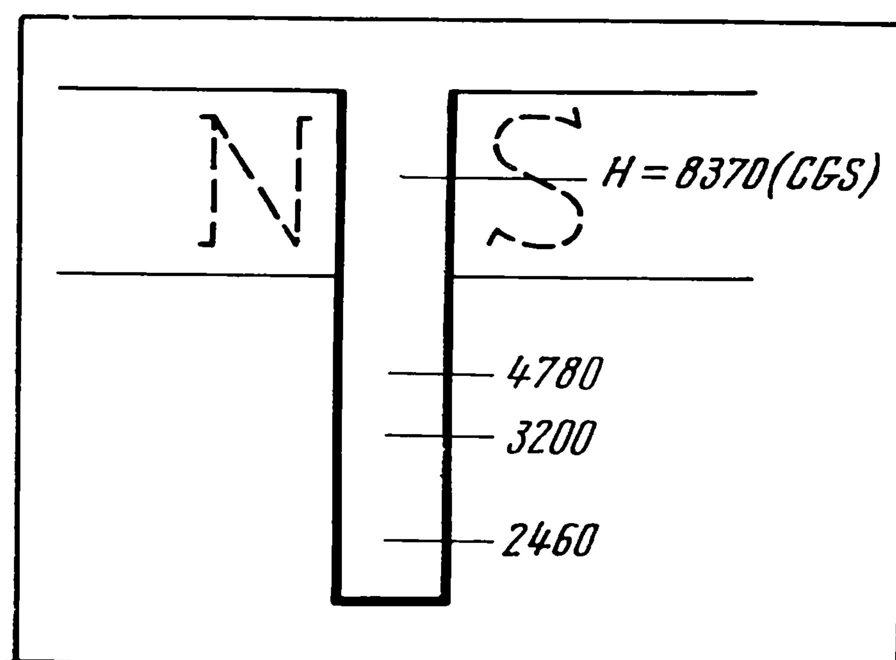


Рис. 2

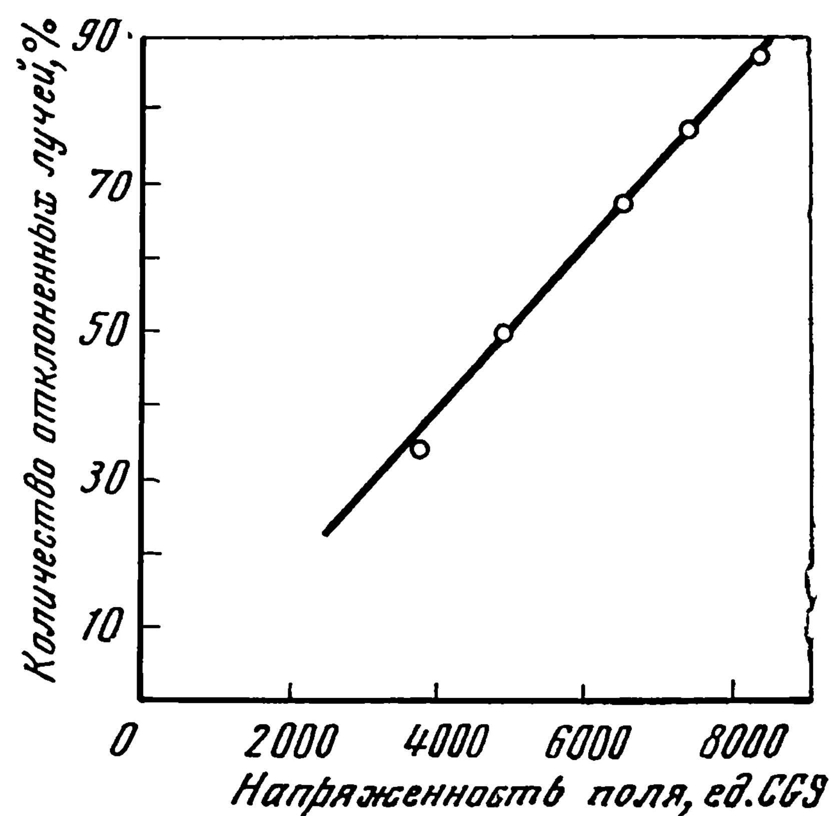


Рис. 3

зультат измерения 4) входит одновременно действие γ-лучей и естественных утечек электроскопа в водороде.

В этом эксперименте существовало значительное рассеянное магнитное поле, действовавшее на лучи до того, как они достигали межполюсного пространства. Распределение этого поля в различных местах установки показано на рис. 2.

Ниже приведены значения скорости разряда, вызываемого α-лучами при различных значениях напряженности магнитного поля. Максимальное значение в отсутствие магнитного поля принято за 100:

Магнитное поле между полюсами, *эл.-стат. ед.*	0	3720	4840	6500	7360	8370
Скорость разряда, вызываемого α-лучами	100	66	50	33	23	11

На рис. 3 эти результаты представлены в виде графика. Кривая на рис. 3 показывает, что количество отклоненных α-лучей примерно пропорционально величине магнитного поля.

В другой установке со средним воздушным промежутком 0,055 *см* лучи были полностью отклонены однородным магнитным полем напряженностью 8400 *эл.-стат.ед.*, которое имело протяженность по всей длине пластинок, на расстояние 4,5 *см*.

Направление отклонения лучей

Чтобы определить направление отклонения, лучи пропускали через щели шириной 1 *мм*. Примерно половина каждой щели была закрыта латунной пластинкой, в которой были прорезаны окошки в точном соответствии с системой параллельных щелей. На рис. 4 в увеличенном масштабе

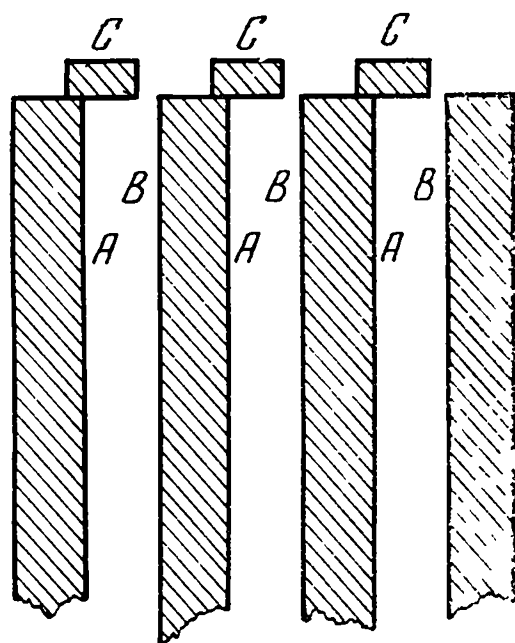


Рис. 4

представлена секция из трех щелей с металлической пластиной C, наполовину закрывающей щель AB. Если приложить магнитное поле, напряженность которого недостаточна, чтобы отклонить все лучи, то скорость разряда в измерительном сосуде при одном направлении магнитного поля, когда лучи отклоняются от A к B, должна быть много больше скорости разряда при обратном направлении поля, когда лучи отклоняются от B к A. Действительно, оказалось, что приложение поля в одном направлении уменьшает скорость разряда незначительно, тогда как при изменении направления поля скорость разряда падает примерно в 4 раза.

Этим способом было найдено, что α-лучи в магнитном поле отклоняются в противоположную по сравнению с катодными лучами сторону, т. е. α-лучи состоят из положительно заряженных частиц.

Отклонение лучей в электростатическом поле

Использован был прибор, аналогичный применявшемуся в опытах по отклонению лучей в магнитном поле, за тем исключением, что латунные стенки, в которых фиксируются пластинки, были заменены эбонитовыми.

Было установлено 25 пластинок длиной 4,50 *см* и шириной 1,5 *см* со средним воздушным зазором 0,055 *см*. Радий находился ниже пластинок на расстоянии 0,85 *см*. Пластинки через одну были соединены и заряжены с помощью батареи небольших аккумуляторов до разности потенциалов 600 *в*. Как и в опытах с магнитным полем, применялся поток водорода.

При разности потенциалов 600 *в* было установлено изменение скорости разряда, обусловленного α-лучами, на 7% при включении и выключении электрического поля[1]. Увеличить разность потенциалов было невозможно, так как в присутствии радия между пластинами возникал пробой.

Величина отклонения в электрическом поле была слишком мала, чтобы можно было определить его направление.

[1] В более поздних, еще не законченных опытах мне удалось отклонить в сильном электрическом поле около 45% α-лучей.

Определение скорости лучей

По известному количеству отклоненных лучей довольно трудно точно определить кривизну их траектории, так как некоторые лучи, испытывающие столкновение с боковой поверхностью параллельных пластинок, могут отклоняться так, что попадают в измерительный сосуд.

Однако из данных, полученных при наблюдении *полного отклонения* лучей в магнитном поле, был сделан вывод, что

$$H\rho = 390\,000,$$

где H — значение магнитного поля; ρ — радиус кривизны траектории лучей. Эта цифра дает верхний предел для значения $H\rho$.

Используя обычные уравнения движения заряженного тела, можно определить скорость лучей

$$V = 2{,}5 \cdot 10^9 \text{ см/сек}$$

и величину отношения заряда носителя к его массе

$$\frac{e}{m} = 6 \cdot 10^3.$$

Эти результаты — лишь грубые оценки, указывающие только порядок соответствующих величин, так как отклонения, наблюдавшиеся в электрическом поле, были слишком малы, чтобы можно было выполнить точные измерения. Эти эксперименты продолжаются со специальной аппаратурой и можно надеяться, что будет получено более сильное отклонение в электростатическом поле, а следовательно, более точное определение характеристик этих лучей [1].

Таким образом, α-лучи радия очень сходны с каналовыми лучами, открытыми Гольдштейном, которые, как показал Вин, состоят из положительно заряженных частиц, движущихся с большой скоростью. Однако скорость α-лучей значительно больше скорости каналовых лучей.

Общие соображения

Значительную часть излучения урана. тория, радия, а также эманаций и возбужденных веществ составляют α-лучи. Эти лучи мало различаются между собой по проникающей способности и, по-видимому, во всех случаях состоят из заряженных частиц, вылетающих с большими скоростями.

---

[1] Вероятно, α-лучи состоят из частиц, вылетающих со скоростями, заключенными в определенных границах, и имеют сложный состав, так как в это излучение вносят свой вклад эманация и возбужденная активность, которые распределены по всему препарату радия.

В одной из предыдущих работ [4] показано, что полная энергия, излучаемая постоянно радиоактивными веществами в виде α-лучей, примерно в 1000 раз больше энергии, излучаемой в виде β-лучей. Этот результат был получен в предположении, что полное количество ионов, образуемых обоими типами лучей при их полном поглощении в воздухе, есть мера излученной энергии. Таким образом, α-лучи вносят основной вклад в излучение энергии активными телами, и, следовательно, любая оценка излучаемой энергии, основывающаяся на одних только β-лучах, приведет к очень заниженному значению.

В настоящее время проводятся эксперименты по определению заряда, переносимого α-лучами. Ожидается, что эти опыты позволят определить поток энергии, излучаемой активными веществами в виде α-лучей.

Корпускулярный характер α-лучей позволяет легко объяснить некоторые их характерные свойства. С этой точки зрения ионизация газа α-лучами обусловлена столкновениями движущихся частиц с молекулами газа. Сразу же становятся понятными влияние давления газа на скорость образования ионов и зависимость поглощения лучей в твердых телах и газах от их плотности. Получается простое объяснение тому замечательному факту, что определяемое электрическим методом поглощение α-лучей в заданном слое вещества *увеличивается* с ростом ранее пройденного в этом веществе расстояния. Необходимо только предположить, что ионизующая способность лучей быстро уменьшается при снижении скорости движущихся частиц в результате столкновений с молекулами поглощающей среды. Скорее всего дело обстоит именно так, ибо нет сомнений в том, что положительно заряженные носители не могут ионизовать газ, если их скорость ниже определенного значения, которое много больше величины скорости движения молекул.

Представляет интерес рассмотреть ту роль, которую могут играть α-лучи в радиоактивных телах, на основе того представления о радиоактивности, которое выдвинуто Содди и мной [5]. В этой работе было показано, что радиоактивность обусловлена последовательностью химических превращений, при которых непрерывно образуются новые виды радиоактивного вещества, и что постоянная радиоактивность общеизвестных тел есть равновесный процесс, в котором скорость образования нового радиоактивного вещества уравновешивается уменьшением активности ранее образовавшегося. В ходе этих исследований возникло несколько очень интересных моментов. Было обнаружено, что остаточное излучение урана и тория, химически очищенных от UX и ThX, состоит исключительно из α-лучей. С другой стороны, излучение UX почти целиком состоит из β-лучей [6], тогда как в состав излучения ThX входят как α-лучи, так и β-лучи [4]. Эти результаты, по-видимому, характерны и для радия, потому что, как показали супруги Кюри, радий, растворенный в воде, а затем выпаренный досуха, на некоторое время теряет в значительной степени свою способность испускать β-лучи.

Таким образом, испускание α-лучей происходит, по-видимому,

совершенно независимо от испускания β-лучей. Несомненно, что α-лучи играют главную роль в изменениях, происходящих в радиоактивном веществе, а испускание активными веществами β-лучей представляет собой вторичное явление. Полученные к настоящему времени результаты приводят к заключению, что последовательность химических превращений, происходящих в радиоактивных телах, начинается с испускания α-лучей, т. е. с вылета из атома тяжелой заряженной массы. Остающаяся после этого часть атома нестабильна и претерпевает в дальнейшем химические превращения, которые опять же сопровождаются испусканием α-лучей, а в некоторых случаях и β-лучей.

Способность радиоактивных веществ испускать, по-видимому самопроизвольно, тяжелые заряженные массы с огромными скоростями подтверждает ту точку зрения, что атомы этих веществ составлены, по крайней мере частично, из вращающихся или колеблющихся систем заряженных тяжелых тел, больших по сравнению с электроном. Внезапный срыв этих масс со своих орбит может быть обусловлен действием еще не известных нам внутренних или внешних сил.

Из корпускулярной природы α-лучей следует также, что радиоактивные вещества, заключенные в закрытых сосудах, достаточно тонких, чтобы не задерживать α-лучи, должны *уменьшаться в весе*. Такое уменьшение на образце радия недавно наблюдал Гейдвейлер [7], но, по-видимому, в таких условиях, когда α-лучи могли сильно поглощаться в стеклянной трубке, в которой находилось активное вещество.

В связи с этим очень важно решить, вызвана ли наблюдавшаяся Гейдвейлером потеря веса уменьшением веса самого радия или уменьшением веса стеклянной оболочки, так как хорошо известно, что лучи радия вызывают быстрое окрашивание стеклянной трубки и, возможно, что наблюдавшиеся эффекты объясняются тем, что химическое изменение доходит до наружной поверхности стекла.

Мак-Гиллский университет, Монреаль,
10 ноября 1902 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rutherford E.* Phil. Mag., January, 1903, 113.
2. *Strutt R.* Phil. Trans. Roy. Soc., 1900.
3. *Crookes W.* Proc. Roy. Soc., 1900.
4. *Rutherford E., Grier A. G.* Phil. Mag., September, 1902.
5. *Rutherford E., Soddy F.* Phil. Mag., September, November 1902.
6. *Soddy F.* Proc. Chem. Soc., 1902.
7. *Heydweiler.* Phys. Zs., 1902.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ РАДИЯ И ТОРИЯ *

(Совместно с Ф. Содди)

§ 1

Элементы торий и радий очень близки по своим радиоактивным свойствам, несмотря на весьма большое различие их относительной активности. Оба создают радиоактивные эманации, и обе эманации, в свою очередь, возбуждают в окружающих телах активность, которая при наличии электрического поля концентрируется главным образом на отрицательном электроде. Однако их конкретные свойства во многом различны, так что при одинаковых условиях соединение радия ведет себя совершенно иначе, чем соединение тория. Объяснение, выдвинутое ранее для тория, удовлетворительным образом описывает все наблюдавшиеся до сих пор факты для радия. Зная постоянные времени соответствующих процессов, можно, исходя из общих принципов, предсказать весь ход любой серии превращений радиоактивности радия при любых заданных условиях. Основное различие заключается в величине скорости, с которой в обоих случаях эманации теряют свою активность. Интенсивность излучения эманации тория спадает в 2 раза в течение 1 *мин*, тогда как такое уменьшение интенсивности у эманации радия происходит примерно за 4 дня. Таким образом, в одном случае превращение происходит примерно в 6000 раз быстрее, чем в другом.

Кроме того, возбужденная активность радия спадает значительно быстрее, чем возбужденная активность тория. Возбужденная активность радия почти незаметна уже через несколько часов после удаления источника, вызывающего возбужденную активность, тогда как возбужденная активность тория сохраняется в течение нескольких дней. Эманация и возбужденная активность радия вносят основной вклад в полную активность, а для тория эти эффекты по разным причинам не так заметны.

Экспериментальные исследования процессов, вызывающих радиоактивность радия, до настоящего времени не дали никаких доказательств существования стадии, соответствующей торию X в случае тория. Следует напомнить, что на первом этапе распада торий превращается не непосредственно в эманацию, а в промежуточную систему, называемую торием X, которая при последующем превращении образует эманацию. В случае радия еще не удалось выделить какую-либо систему, промежу-

* Philosophical Magazine, April, 1903, ser. 6, 5, 445—457.

точную между радием и эманацией радия. По аналогии с торием следовало бы ожидать, что существует RaX, аналогичный ThX, однако имевшегося в нашем распоряжении радия было слишком мало, чтобы получить определенный ответ на этот вопрос.

После удаления эманации и возбужденной активности радий сохраняет около 25% своей нормальной активности. Эту остаточную активность нельзя считать результатом химических процессов, она представляет собой «неотделимую» активность, аналогичную той, которой обладают торий и уран. Однако еще не известно, не есть ли это на самом деле *неотделенная* активность «радия X», накладывающаяся на истинную неотделимую активность.

В настоящей статье подробно исследуется радиоактивность радия. Полученные результаты согласуются с представлением, что радий с постоянной скоростью спонтанно превращается в эманацию радия, дальнейшие превращения которой вызывают явление возбужденной активности. Кроме того, сравнительное изучение обеих эманаций позволяет дать окончательный ответ на ряд дискуссионных вопросов [1] о природе излучающей способности тория (см. § 3).

§ 2. Скорость уменьшения активности эманации радия

Давно известно, что активность эманации радия убывает очень медленно и необходимы специальные методы для измерения скорости ее уменьшения. Эманация в смеси с воздухом получалась из раствора хлорида радия, находившегося в закрытой бутыли, и накапливалась над ртутью в обычном газгольдере. Время от времени с помощью газовой пипетки отмеряли одинаковые порции газа и помещали его в измерительный сосуд. Последний представлял собой воздухонепроницаемый латунный цилиндр с центральным электродом, который был изолирован эбонитовой пробкой, снабженной заземленным предохранительным кольцом. Напряжение достаточной величины, чтобы получить ток насыщения, прикладывалось к цилиндру, а внутренний электрод присоединялся к электрометру параллельно с конденсатором соответствующей емкости. Содержимое газгольдера тщательно перемешивалось путем встряхивания, затем с помощью пипетки отмеряли определенный объем газа и вдували его в цилиндр, который после этого герметически закрывали. Ионизационный ток *сразу же* после введения эманации являлся мерой ее активности. Измерения повторялись через соответствующие интервалы времени на протяжении 33 дней, пока эффект не стал слишком малым для проведения точных измерений.

Ниже приведены результаты:

Время, *час*	0	20,8	187,6	354,9	521,9	786,9
Относительная активность	100	85,7	24,0	6,9	1,5	0,19

Видно, что активность убывает со временем в геометрической прогрессии и уменьшается вдвое за 3,71 дня.

Если I_0 — начальная активность, а I_t — активность спустя время t, то

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t}.$$

Если в качестве λ взять значение, получающееся из последних четырех измерений, приведенных выше, то

$$\lambda = 2{,}16 \cdot 10^{-6} = 1/463\,000$$

(t выражается в *сек*).

В этих экспериментах влияние возбужденной активности исключалось тем, что ток измерялся непосредственно после введения эманации в цилиндр. В замкнутом пространстве ионизационный ток после введения эманации непрерывно возрастает, сначала очень быстро, а затем медленнее, пока через 5—6 *час* не достигнет максимума, который примерно вдвое больше начального тока. После этого ток уменьшается по указанному выше закону спада активности эманации. Если по достижении максимума выдуть эманацию из измерительного сосуда, то остается возбужденная активность, которая концентрируется на отрицательном электроде и составляет около половины от общей активности. В описываемых экспериментах после введения эманации проводились измерения тока через одинаковые короткие промежутки времени. Из полученных результатов можно легко определить долю тока, обусловленного эманацией, так как относительное увеличение тока, обусловленного возбужденной активностью, для любого интервала времени не зависит от количества и «возраста» эманации и одинаково для всей серии опытов.

Во время выполнения этой работы П. Кюри в статье под названием «О постоянной времени исчезновения *радиоактивности, наведенной радием в замкнутом объеме*» [2] опубликовал результат, аналогичный приведенному выше относительно скорости спада активности эманации радия. Он представляет собой интересный пример того, как измерение скорости уменьшения возбужденной (или наведенной) активности эманации радия, содержащейся в замкнутом объеме, на самом деле дает скорость спада активности этой эманации, а вовсе не возбужденной активности, которая в свободном виде на воздухе убывает с такой же скоростью, как и в закрытом стеклянном сосуде.

Кюри измерял проникающее излучение от запаянной стеклянной трубки, содержащей эманацию радия. Так как последняя не испускает проникающих лучей (ср. § 5), то измеряемый эффект был обусловлен исключительно возбужденной активностью, создаваемой эманацией в стенках. Мы знаем, что через несколько часов этот эффект достигает максимума, а затем возникает равновесие, когда спад возбужденной активности уравновешивается непрерывным образованием из эманации нового активного

вещества. По мере убывания активности эманации в такой же степени убывает и ее способность создавать возбужденную активность. Следовательно, возбужденная активность в закрытой трубке, содержащей эманацию радия,—это мера активности самой эманации. По истечении нескольких часов ее постоянная распада становится равной постоянной распада эманации. Если в какой-то момент удалить эманацию из трубки, то, как показали опыты Кюри, скорость спада активности сразу же изменяется и становится равной скорости убывания возбужденной активности.

Кюри выполнял свои опыты при самых различных условиях, и это во всех случаях не повлияло на скорость убывания активности точно так же, как это показано нами при исследовании эманации тория. Однако Кюри, по-видимому, не заметив начального периода увеличения активности, утверждает, что изменение времени «активизации» (выдержки над исходным радием) от 15 *мин* до одного месяца не влияет на скорость убывания активности. Как мы видели, в течение 5—6 *час* возбужденная активность сначала возрастает, а не уменьшается, а за такой период, как 15 *мин*, этот эффект должен был бы быть очень заметным. Это возрастание активности, обусловленное непрерывным образованием возбужденной активности при переносе эманации из одного сосуда в другой,— лишь один из многих аналогичных примеров, накопленных к настоящему времени. Однако трудно найти лучшую иллюстрацию истинной природы явлений радиоактивности, которую можно было бы получить в столь же простом эксперименте. Некоторое количество эманации отделяется от выделяющего ее радия и в смеси с воздухом накапливается, подобно обычному газу, над ртутью в газгольдере. Через несколько недель порция газа помещается в новый сосуд, причем обнаруживается, что активность эманации в течение нескольких часов каждый раз возрастает вдвое по сравнению с первоначальным значением. Это говорит о том, что эманация все время образует новое активное вещество, которое вызывает возбужденную активность. Максимум достигается не потому, что прекращается процесс образования, а наступает в результате достижения равновесия между скоростью возникновения нового активного вещества и скоростью уменьшения уже имеющегося.

§ 3. Окклюзия эманаций

В твердом состоянии соединения радия выделяют столь малое количество эманации, что необходимы специальные методы для ее обнаружения. Как и в случае соединений тория, тепло или влага, а особенно растворение в воде усиливают способность радия выделять эманацию, причем для радия эти эффекты значительно более заметны. Те же соображения справедливы и в отношении способности радия создавать возбужденную, или наведенную, активность в телах, расположенных по соседству с ним, так как при любых условиях возбужденная активность пропорциональна

только количеству присутствующей эманации. Эти изменения в способности соединений радия создавать возбужденную активность наблюдались Дорном и супругами Кюри.

Деэманировать соединения радия можно с помощью прокаливания, причем такие соединения восстанавливают свою способность выделять эманацию сразу же, как только их растворят [3], т. е. точно так же, как и в исследованном нами случае соединений тория. Вообще говоря, можно утверждать, что как радий, так и торий в растворенном виде обладают практически максимальной эманирующей способностью.

Возникает вопрос, чем обусловлены эти различия в эманирующей способности, т. е. в том количестве эманации, которое образуется 1 *г* за 1 *сек*. Было показано, что в случае тория эти различия можно интерпретировать двумя способами. Либо изменяется скорость реакции образования эманации, либо количество образующейся эманации одинаково во всех случаях, но время, которое требуется эманации, чтобы покинуть соединение, при разных условиях различно. Этот вопрос, довольно несущественный в случае тория, приобретает первостепенную важность в случае радия. Поскольку эманация радия теряет свою активность только через несколько недель, то представление о том, что эманация образуется непрерывно с постоянной скоростью, с необходимостью приводит к выводу, что в твердом соединении радия, не выделяющем эманации, должно существовать большое количество накопленной, или «окклюдированной», эманации. При растворении этого соединения из раствора возникнет внезапный «скачок» потока эманации, во много раз больший, чем то количество эманации, которое образуется в дальнейшем. Если предположить, что эманация совсем не улетучивается из твердой соли радия и что при растворении этой же соли эманация выделяется из нее сразу по мере своего образования, то легко вычислить отношение количества эманации, выделяющейся из раствора во время первого «скачка», к количеству эманации, выделяющейся за любой другой промежуток времени.

Пусть q_0 — число частиц эманации, образуемых за 1 *сек* данным количеством радия; N_0 — число частиц эманации, накопленных этим радием, находящимся в твердом состоянии; N_0 представляет собой количество частиц в равновесном состоянии, когда скорость образования новых частиц эманации уравновешивается скоростью превращения уже существующих. Если бы процесс образования остановился, то количество частиц N_t, оставшихся через время t, давалось бы формулой

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t},$$

где λ — постоянная спада активности эманации. Скорость превращения

$$\frac{dN_t}{dt} = -\lambda N_t.$$

Поэтому при равновесии

$$q_0 = \lambda N_0$$

и

$$\frac{N_0}{q_0} = \frac{1}{\lambda} = 463\,000,$$

если подставить значение λ, найденное в § 2.

Таким образом, количество эманации, накопленной в окклюдирующем ее соединении радия, должно быть примерно в 500 000 раз больше количества эманации, образуемой ежесекундно. Этот результат был проверен следующим образом: 0,03 *г* твердого хлорида радия с активностью, в 1000 раз превышающей активность урана, поместили в склянку Дрекселя и растворили в достаточном количестве воды. Освободившуюся эманацию струей воздуха перенесли в газгольдер, а оттуда в большой измерительный цилиндр. Максимальный ионизационный ток, наблюдаемый сразу же после введения эманации, пропорционален N_0.

Затем в течение нескольких минут над раствором радия продували быстрый поток воздуха, после чего склянку Дрекселя герметически закрывали на определенное время (на 105 *мин*). В конце этого срока накопленная эманация, как и раньше, удалялась и помещалась в измерительный сосуд. Новый ионизационный ток соответствует N_t — количеству эманации, образованной за время t.

Окклюдированная эманация N_0 привела к скорости разряда электрометра 4,46 делений в секунду при включенной параллельно емкости 0,494 *мкф*.

Эманация, образовавшаяся за 105 *мин*, дала скорость разряда 5,48 делений в секунду при емкости 0,00526 *мкф*.

Таким образом,

$$\frac{N_t}{N_0} = 0{,}0131.$$

Предполагая, что за интервал t не происходило спада активности, получаем

$$N_t = 105 \cdot 60 q_0.$$

Следовательно,

$$\frac{N_0}{q_0} = 480\,000.$$

Производя небольшую поправку, учитывающую спад активности за время t, получим

$$\frac{N_0}{q_0} = 477\,000.$$

Перед этим мы показали, что согласно теории

$$\frac{N_0}{q_0} = \frac{1}{\lambda} = 463\,000.$$

Таким образом, согласие между теорией и экспериментом настолько близко, насколько вообще можно было ожидать. Здесь мы имеем интересный пример метода, с помощью которого процессы, происходящие в радиоактивных телах, могут быть подвергнуты количественному исследованию.

Этот опыт окончательно доказывает, что образование эманации в твердом соединении радия, не выделяющем эманации, происходит с той же скоростью, что и в растворе. В первом случае эманация окклюдируется, во втором — улетучивается сразу же по мере образования.

Из опыта известно, что выделение эманации твердым хлоридом радия в сухой атмосфере составляет менее 0,5% от количества, выделяемого раствором, или, выражаясь другими словами, количество эманации, выделяющейся за 1 *сек*, составляет меньше 10^{-8} от количества эманации, окклюдированной в этом соединении. Однако влажность во много раз увеличивает эту цифру.

Точно такие же соображения применимы и в случае тория. Если образование эманации тория при всех обстоятельствах происходит с одной и той же скоростью, то растворение твердого, не выделяющего эманацию соединения тория должно сопровождаться вначале «скачком» потока эманации, значительно бóльшим по величине, чем количество эманации, образующейся впоследствии. Однако очень большая скорость спада активности эманации делает этот эффект менее заметным. Для эманации тория

$$\frac{N_0}{q_0} = \frac{1}{\lambda} = 87.$$

Было показано, что нитрат тория в твердом состоянии выделяет только $^1/_{200}$ часть того количества эманации, которое выделяется тем же соединением, находящимся в растворе. Некоторое количество тонко измельченного нитрата тория поместили в склянку Дрекселя, наполненную горячей водой, и сильной струей воздуха эманацию сразу же перенесли в измерительный сосуд.

Ионизационный ток в сосуде возрос до максимума, а затем снова упал до постоянного значения, показывая, что количество эманации, освободившейся при растворении нитрата, больше последующего количества эманации, образующейся в растворе. Большая скорость спада активности затрудняет количественное сравнение. Однако небольшое видоизменение эксперимента позволило получить однозначное доказательство того, что скорость образования эманации в твердом соединении такая же, как в растворе. После того как порошок нитрата высыпали в сосуд, через раствор в измерительный сосуд в течение 25 *сек* продували сильный воздушный поток. После прекращения продувания сразу же измерили ионизационный ток в измерительном сосуде. Затем раствор оставили в покое на 10 *мин*; за это время количество эманации, накопленной в склянке Дрекселя, практически достигло максимума и снова установилось равновесное состояние. После этого, как и прежде, в течение 25 *сек* продували воздушный поток, после чего вновь измерили ионизационный ток.

В обоих случаях было зарегистрировано отклонение электрометра на 100 делений за 6,8 *сек.* При непрерывном продувании воздуха через раствор отклонение, измеренное по достижении равновесного состояния, составило 100 делений за 12,6 *сек*, т. е. около половины значения, измеренного после первого «скачка».

Таким образом, у тория и радия образование эманации действительно происходит с одной и той же скоростью как в соединениях, окклюдирующих эманацию, так и в соединениях, интенсивно ее выделяющих.

Нагревание действует на твердые соединения радия, не выделяющие эманацию, совершенно так же, как действует на них растворение. Давно известно, что при нагревании выделение эманации твердыми препаратами радия возрастает в сотни тысяч раз. Как и в случае растворения, окклюдированная эманация освобождается, после чего эффект снова падает до значения, приближающегося к истинному количеству эманации, образующейся за 1 *сек.*

Такое соединение, как окись тория, обладающее в твердом виде способностью выделять эманацию, составляющую от $^1/_3$ до $^1/_4$ значения этой способности такого количества тория в растворе, при нагревании до слабого красного каления увеличивает свою способность выделять эманацию в 3—4 раза. С другой стороны, такие соединения, как гидроокись или карбонат тория, которые в твердом виде обладают такой же способностью выделять эманацию, что и в растворенном, не обнаруживают увеличения этой способности при возрастании температуры.

Таким образом, изменения способности соединений тория и радия выделять эманацию, возникающие при прокаливании, увлажнении, растворении и т. д., следует приписать исключительно изменениям в скорости, с которой газообразная эманация улетучивается из образовавшего ее вещества в окружающее пространство. Этот результат очень важен для общей теории радиоактивности, так как он приводит в соответствие факты, которые иначе можно было бы рассматривать как исключение из общего представления о том, что процессы, поддерживающие радиоактивность, лежат вне сферы известных нам молекулярных сил.

Здесь можно обратить внимание на тот факт, что общее явление окклюзии газа твердым телом совсем не связано с радиоактивными свойствами исследуемого вещества, хотя в рассмотренных примерах радиоактивность дает удобный способ детального изучения этой проблемы. Например, при нагревании минерала фергюсонита гелий выделяется частично, а при растворении минерала — полностью.

Таким образом, следует ожидать, что если какие-то неизвестные конечные продукты превращения какого-либо радиоактивного элемента газообразны, то они в значительных количествах могут оказаться окклюдированными в природных минералах, содержащих этот элемент. Это подтверждает выдвинутое ранее предположение [1], что гелий, возможно, есть конечный продукт распада одного из радиоактивных элементов, так как только он обнаруживается в радиоактивных минералах.

§ 4. Влияние эманации на радиоактивность радия

Сейчас мы рассмотрим изменения, происходящие при растворении в воде твердого препарата радия. Один из самых первых фактов, который был замечен при исследовании радия, заключается в непрерывном увеличении его активности после приготовления препарата [4]. Рассмотрим случай, когда препарат радия в течение некоторого времени содержался в растворе на открытом воздухе, а потом был выпарен досуха. Эманация, которая ранее улетучивалась, теперь окклюдируется. Постепенное накопление эманации и создаваемой ею возбужденной активности вызывает постепенное увеличение активности препарата, пока через несколько недель не достигается максимум. Твердое соединение радия, будучи растворено в воде и сразу же выпаренное досуха, теряет свою окклюдированную эманацию, но сохраняет созданную ею возбужденную активность. Следовательно, в этом случае сначала произойдет довольно быстрый спад активности, после чего через несколько часов начнется медленное увеличение активности, обусловленное, как и прежде, образованием и окклюзией новой эманации.

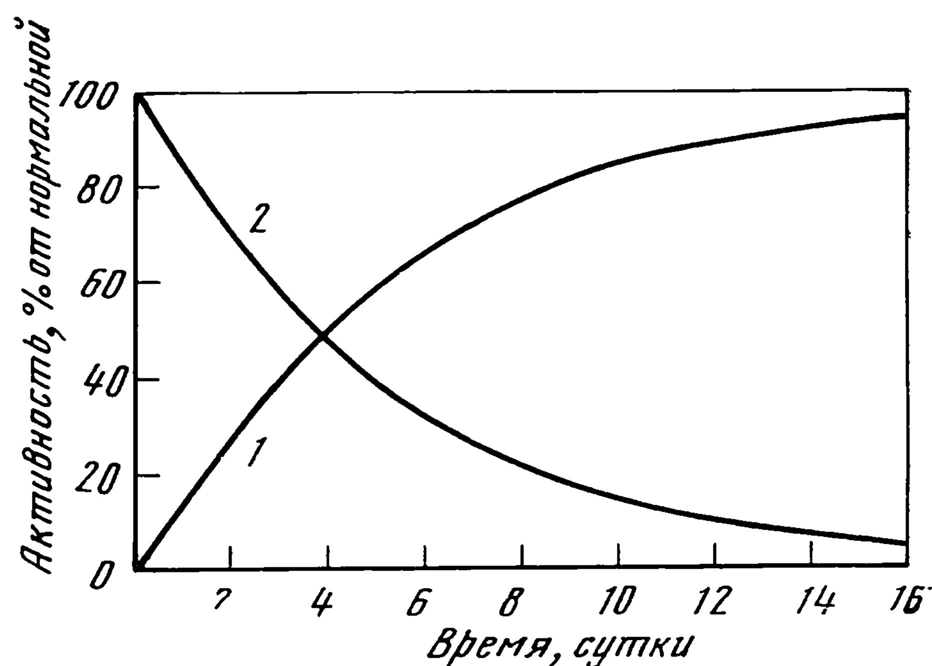
С другой стороны, независимо от соображений о существовании RaX, аналога ThX, из общего сходства с ураном и торием следует ожидать, что в результате удаления эманации и возбужденной активности радиоактивность полностью не исчезнет. Останется определенная часть полной активности, составляющая неотделимую активность.

Эти соображения подтверждаются экспериментально. Хлорид радия растворяли в воде, и через раствор пропускали поток воздуха. Было обнаружено, что после нескольких часов продувки радиоактивность соли, получающейся из раствора, уменьшается до минимума; более длительное продувание воздуха в течение трех недель никакого дальнейшего влияния не оказывает. Это и есть неотделимая активность. Растворы были выпарены досуха. В течение трех недель наблюдали ход восстановления активности, после чего активность стала постоянной, примерно в 4 раза больше первоначального значения. Результаты представлены в таблице.

Во втором столбце конечная активность принята за 100, а в третьем столбце указана доля восстановленной активности. Эти результаты пред-

Время, *сутки*	Активность, %	Величина восстановленной активности, %	Время, *сутки*	Активность, %	Величина восстановленной активности, %
0	25,0	0	7,83	83,5	78,0
0,70	33,7	11,7	16,0	96,0	95,0
1,77	42,7	23,7	21,0	100,0	100,0
4,75	68,5	58,0			

ставлены на графике (кривая *1*). Кривая *2* изображает убывание активности эманации, построенное на основе данных, приведенных в § 2. Обе кривые совершенно аналогичны кривым, которые получаются соответственно для убывания и восстановления активности UX и ThX. Доля активности, приобретенной за время t, выражается формулой



$$\frac{I_t}{I_0} = 1 - e^{-\lambda t},$$

где λ — постоянная уменьшения активности эманации радия. Таким образом, можно получить кривую восстановления активности радия, если известна скорость спада активности эманации. В этих экспериментах неотделимая активность составляла 25% от конечного значения. Остальные 75% обусловлены активностью эманации вместе с создаваемой ею возбужденной активностью.

Приведенное выше уравнение является приближенным вследствие наличия задержки в несколько часов, обусловленной временем, необходимым для того, чтобы возбужденная активность достигла равновесного значения при любом заданном количестве эманации. Однако этот эффект слишком мал, чтобы заметно повлиять на результаты, и им можно пренебречь.

Примерно аналогичные эксперименты были проделаны для тория. Образец гидроокиси тория, обладающий высокой способностью выделять эманацию, после прокаливания паяльной лампой превратился в деэманированную окись тория. Было обнаружено, что ее активность возрастает со временем примерно на 20% за три дня и по достижении более высокого значения остается на постоянном уровне.

В другом эксперименте гидроокись тория в течение трех дней выдерживалась в жидком воздухе, т. е. в условиях, когда ее эманация конденсируется и создает возбужденную активность в самом соединении. Затем гидроокись рассыпали на пластине, и оказалось, что за несколько дней ее активность уменьшилась примерно на 12%. Такого результата и следовало ожидать, если скорость образования эманации постоянна и не зависит от химических или физических условий. Когда эманации не позволяют улетучиваться, ее активность, а также создаваемая ею возбужденная активность приводят к увеличению интенсивности испускаемого излучения. Во втором случае активность уменьшается, так как при обычных температурах часть эманации освобождается и вследствие этого уменьшается возбужденная активность в соединении.

§ 5. Излучения радия

Подобно торию и урану, радий испускает два типа излучения: легко поглощаемые лучи, или α-лучи (отклоняющиеся в очень сильном магнитном поле), и проникающие лучи, или β-лучи, легко отклоняемые магнитным полем. Радий испускает также очень проникающие лучи, которые, однако, еще не изучены полностью. Неотделимая активность радия, которая остается после удаления эманации и возбужденной активности, состоит только из α-лучей, причем остающееся β-излучение составляет менее $^1/_{200}$ от нормально существующего. В этом отношении все три радиоактивных элемента одинаковы.

Для измерения излучения эманации радия ее вводили в цилиндр из медной фольги толщиной 0,005 *см*, который поглощает все α-лучи, но пропускает с небольшими потерями β-лучи. Внешнее излучение от этого цилиндра измерялось через определенные интервалы времени, причем измерение начиналось примерно через 2 *мин* после введения эманации. Вначале излучение было чрезвычайно мало, но затем быстро увеличивалось, и через 3—4 *час* достигало максимума. Таким образом, эманация радия тоже испускает только α-лучи, а β-лучи появляются после того, как эманация превратится в возбужденную активность. После удаления эманации из цилиндра с помощью струи воздуха немедленного уменьшения интенсивности излучения не наблюдалось, однако со временем излучение начинало быстро ослабевать, и примерно за 30 *мин* уменьшалось вдвое. Аналогичный результат получил П. Кюри.

В работе [5] обращалось внимание на необычный характер кривых убывания возбужденной активности как тория, так и радия, если их измерять по α-излучению, и было выдвинуто предположение, что эта стадия, по-видимому, представляет собой двойное превращение в случае тория и тройное превращение в случае радия. В последнем случае (при кратковременном воздействии эманации) в первые 10 *мин* наблюдается очень быстрый спад активности до 20% от первоначального значения, затем следует период очень медленного превращения, а потом обычный спад, при котором остающаяся активность уменьшается наполовину за 30 *мин*.

Далее, кривая убывания β-излучения возбужденной активности радия обнаруживает довольно правильное спадание до половинного значения за 30 *мин*. Следовательно, здесь мы имеем веское доказательство того, что при первом превращении возбужденной активности β-лучи не испускаются и что они появляются только при втором или третьем превращении.

Таким образом, радий полностью подтверждает развитую ранее точку зрения, что α-лучи во всех случаях должны возникать первыми, а β-лучи образуются только на последних стадиях этого процесса, который может быть прослежен экспериментально.

§ 6. Химические свойства эманации радия

Описанные ранее эксперименты по изучению химических свойств эманации тория были повторены для эманации радия. Как и в случае эманации тория, все применявшиеся реагенты оказались неэффективными. Эманация без изменений проходила через пятиокись фосфора, серную, азотную и соляную кислоты, над раскаленным докрасна хроматом свинца и металлическим магнием. Вода не растворяет эманацию в заметных количествах, а активность воды обусловлена исключительно присутствующей возбужденной активностью. Эманация как в сухой, так и во влажной атмосфере не подвергается изменениям при прохождении через платиновую трубку, нагреваемую с помощью электричества почти до точки плавления. Однако при температуре белого каления в этом эксперименте наблюдается интересный эффект.

Ионизационный ток, вызванный эманацией, уменьшается при повышении температуры, но возвращается к своему первоначальному значению при увеличении приложенного напряжения до получения тока насыщения в газе. Этот эффект обусловлен тончайшей платиновой пылью, выделяющейся из платины при нагревании ее до белого каления, и совершенно аналогичен действию табачного дыма, наблюдавшемуся в нашей лаборатории Оуэнсом [6].

Конденсация радиоактивных эманаций тория и радия при температуре жидкого воздуха [7] будет подробно обсуждаться в отдельной статье.

Мак-Гиллский университет, Монреаль,
20 февраля 1903 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rutherford E.* Phil. Mag., 1902, **4**, 582.
2. *Curie P.* Compt. Rend., 1902, **135**, 857.
3. *Curie M., Curie P.* Compt. Rend., 1902, **134**, 85.
4. *Giesel.* Wied. Ann., 1899, **6a**, 91.
5. *Rutherford E.* Phil. Mag., January, 1903.
6. *Owens R. B.* Phil. Mag., 1899, **48**, 377.
7. *Rutherford E.* Proc. Chem. Soc., 1902, 219.

РАДИОАКТИВНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ *

(Совместно с Ф. Содди)

Содержание

§ 1. Продукты радиоактивного превращения и их специфическая материальная природа
§ 2. Синхронизм между превращением и излучением
§ 3. Материальная природа излучений
§ 4. Закон радиоактивного превращения
§ 5. Сохранение радиоактивности
§ 6. Связь между радиоактивным и химическим превращениями
§ 7. Энергия радиоактивного превращения и внутренняя энергия химического атома

§ 1. Продукты радиоактивного превращения и их специфическая материальная природа

В предыдущих работах было показано, что радиоактивность элементов радия, тория и урана поддерживается непрерывным образованием новых видов вещества, обладающих временной активностью. В некоторых случаях новые продукты значительно отличаются по своим химическим свойствам от элементов, из которых они образовались, и могут быть отделены с помощью химических процессов. Например, торий X может быть отделен от тория, а уран X от урана. В других случаях новые продукты газообразны и выделяются самостоятельно путем обычной диффузии, образуя радиоактивные эманации. Эти эманации при низких температурах можно сконденсировать, а затем снова перевести в газообразное состояние. Хотя, по-видимому, эманации не вступают в химическую связь, они часто окклюдируются в образовавших их веществах, когда последние находятся в твердом состоянии, и освобождаются при растворении. Эманации быстро диффундируют в атмосфере и через пористые перегородки и вообще ведут себя как инертные газы с довольно большим молекулярным весом. С другой стороны, в иных случаях новое вещество само по себе нелетуче, но образуется при дальнейшем превращении газообразной эманации, так что последняя служит посредником в процессе его выделения из радиоактивного элемента. Это характерно для двух различных видов возбужденной активности, создаваемой соединениями тория и соответ-

* Philosophical Magazine, May 1903, ser. 6, 5, 576—591.

ственно радия в телах, расположенных по соседству с ними: эта активность обладает отчетливо выраженными материальными свойствами. Например, возбужденная активность тория улетучивается при довольно высокой температуре и оседает поблизости, растворяется в одних реагентах и не растворяется в других.

Таким образом, эти новые вещества отличаются от обычного вещества только одним — их количество столь мало, что не может быть обнаружено обычными методами химического и спектроскопического анализа. Однако это не может служить аргументом против их материального существования; примером может служить сам природный радий. Не существует достаточно чувствительного химического или спектроскопического метода обнаружения радия в урановой смолке, пока путем обогащения его количество не будет увеличено во много раз, так что начинает появляться его характеристический спектр. М. Кюри, а также Гизель добились успеха в получении вполне заметных количеств чистых соединений радия, переработав много тонн урановой смолки. Результаты показывают, что радий — действительно один из наиболее характерных и изученных химических элементов. Таким образом, эти новые разнообразные вещества, существование которых обнаруживается благодаря их радиоактивности, несомненно, тоже могли бы исследоваться старыми методами, если бы только удалось во много раз увеличить их количество.

§ 2. Синхронизм между превращением и излучением

В настоящей статье будет рассмотрена природа превращений, в процессе которых образуются эти новые вещества. К настоящему времени накоплены достаточно полные экспериментальные данные, чтобы с достаточной уверенностью и определенностью развить общую теорию этого процесса. Из этих данных сразу же становится ясно, что между радиоактивностью и поддерживающими ее процессами существует значительно более тесная связь, чем это выражено в идее образования активного вещества. Следует упомянуть, что все изучавшиеся случаи радиоактивного превращения сводятся к образованию одного вещества из другого (если не учитывать испускаемые лучи). Когда происходит несколько превращений, то они происходят не одновременно, а последовательно. Так, торий образует торий X, торий X образует эманацию тория, а последняя образует возбужденную активность. Далее, можно показать, что радиоактивность каждого из этих веществ связана не с превращением, в котором оно само образовалось, а с превращением, в котором, напротив, оно само образует следующий новый тип вещества. Так, после отделения тория X от образовавшего его тория интенсивность излучения тория X пропорциональна количеству производимой им эманации, и как радиоактивность, так и выделение эманации из тория X уменьшаются по одинаковому закону и *с одинаковой скоростью*. На следующем этапе эманация образует возбужденную активность. Активность эманации спадает вдвое

за 1 *мин*, и количество возбужденной активности, создаваемой ею, спадает в такой же пропорции. Эти результаты полностью подтверждаются в случае радия. Активность эманации уменьшается наполовину за 4 дня. Так же обстоит дело с ее способностью создавать возбужденную активность.

Следовательно, радиоактивность нельзя рассматривать как следствие превращений, которые уже произошли. По всей вероятности, испускаемые лучи сопровождают превращение излучающей системы в другую систему.

Неотделимая активность. Эта точка зрения сразу же объясняет существование в каждом из трех радиоактивных элементов постоянной радиоактивности, не отделимой химическими методами. Эта неотделимая активность состоит из излучений, сопровождающих первичное превращение самого радиоактивного элемента в первый образующийся из него новый продукт. Так, у тория около 25% α-излучения сопровождают первое превращение тория в торий X. В уране все α-излучение — неотделимое и сопровождает превращение урана в уран X.

Из того вывода, что излучения сопровождают превращение, вытекает несколько важных следствий. Радиоактивное тело *ipso facto* должно подвергнуться превращению, и, следовательно, невозможно, чтобы любой из новых видов радиоактивного вещества (например, уран X, торий X, обе эманации и т. д.) был идентичен с каким-либо из известных элементов, потому что они существуют только в течение короткого времени и уменьшение их активности есть выражение непрерывно уменьшающегося их количества. С другой стороны, поскольку конечные продукты этих превращений не могут быть радиоактивными, всегда должна существовать по крайней мере одна стадия этого процесса, не поддающаяся исследованию применяемыми экспериментальными методами. По этой причине конечные продукты, получающиеся в результате превращений, остаются неизвестными, а их количество — неопределенным, за исключением тех случаев, когда возможно применение радиоактивных методов. В природных минералах, содержащих радиоактивные элементы, эти превращения происходят, очевидно, постоянно в течение очень длительного времени, и конечные продукты, если только они не улетучиваются, должны накапливаться в количествах, достаточных для обнаружения; следовательно, они должны встречаться в природе как неизменные спутники радиоактивных элементов. На основании этих и ряда других причин мы выдвинули предположение, что гелий, возможно, и есть такой конечный продукт, хотя, конечно, это предположение сейчас еще чисто умозрительное. Детальное изучение радиоактивных минералов, по всей вероятности, позволит получить более точные данные.

§ 3. Материальная природа излучений

Представление, заключающееся в том, что луч или несколько лучей образуются в некоторой системе в тот момент, когда эта система претерпевает превращение, получило сильное подтверждение, когда было об-

наружено отклонение α-лучей в электрическом и магнитном полях. Это отклонение происходит в противоположную сторону по сравнению с β-, или катодными, лучами; следовательно, α-лучи состоят из положительно заряженных частиц, вылетающих с большой скоростью [1], которая, как было показано, составляет по порядку величины $2{,}5 \cdot 10^9$ *см/сек*. Отношение e/m заряда носителя к его массе составляет величину порядка $6 \cdot 10^3$, тогда как для катодных лучей e/m примерно равно 10^7. Если предположить, что величина заряда в обоих случаях одинакова, то масса испускаемой положительно заряженной частицы в 1000 с лишним раз больше, чем в случае катодных лучей. Измеренное в опытах по электролизу воды отношение e/m для атома водорода составляет 10^4. Таким образом, частицы, из которых состоят α-лучи, ведут себя так, как будто их масса по порядку величины равна массе атома водорода. Образованные всеми радиоактивными элементами и разными радиоактивными телами α-лучи обладают одинаковыми свойствами и слегка различаются лишь по проникающей способности. Таким образом, имеются веские основания считать, что вообще все α-лучи представляют собой поток испущенных частиц и что масса частицы по порядку величины совпадает с массой атома водорода, и очень велика по сравнению с массой частиц, образующих легко отклоняемые β-лучи того же самого элемента.

Если расценивать роль, которую играют в радиоактивности оба типа излучения, то не может быть сомнения в том, что значение α-лучей гораздо большее. Во всех случаях на них приходится более 99% излучаемой энергии; и хотя β-лучи, ввиду их проникающей способности и заметного фотографического действия, изучаются более широко, они имеют гораздо меньшее значение, нежели α-лучи.

Известно, что неотделимая активность всех трех радиоактивных элементов, активность обеих эманаций и первая ступень возбужденной активности радия проявляются только в испускании α-лучей. И только когда эти процессы, насколько может быть прослежен экспериментально их ход, близки к завершению, появляются β-, или катодные, лучи [1].

В свете этих данных имеются все основания предположить, что испускание заряженной частицы не просто сопровождает превращение, но что это испускание фактически и есть превращение.

§ 4. Закон радиоактивного превращения

Гипотеза, согласно которой превращение радиоактивного вещества сопровождается излучением, позволяет дать очень ясное физическое толкование закону спада радиоактивности. Во всех случаях, когда отде-

[1] Кроме α- и β-лучей, радиоактивные элементы испускают также третий, исключительно проникающий тип излучения. Эти проникающие лучи испускает как радий, так и торий [2]. Позднее было найдено, что и уран обладает тем же свойством. Эти лучи еще недостаточно хорошо изучены, поэтому еще рано говорить об их роли в радиоактивных процессах.

ляли один из радиоактивных продуктов и исследовали его активность независимо от радиоактивного вещества, из которого он образовался, было обнаружено, что активность при всех исследованных условиях уменьшается со временем по закону геометрической прогрессии. Это выражается уравнением

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t},$$

где I_0 — первоначальный ток, вызванный излучениями; I_t — ток через время t; λ — константа. Каждый луч, т. е. вылетевшая частица, обычно производит на своем пути определенное количество ионов, поэтому ионизационный ток пропорционален количеству таких частиц, вылетающих за 1 *сек*. Таким образом,

$$\frac{n_t}{n_0} = e^{-\lambda t},$$

где n_t — количество частиц, вылетающих в единицу времени в момент времени t; n_0 — первоначальное значение этой величины.

Если каждая система, претерпевающая превращение, испускает один луч, то количество систем N_t, остающихся неизменными к моменту времени t, выражается формулой

$$N_t = \int_t^\infty n_t dt = \frac{n_0}{\lambda} e^{-\lambda t}.$$

Первоначальное значение N_0 получается подстановкой $t = 0$:

$$N_0 = \frac{n_0}{\lambda};$$

тогда

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}.$$

Этот же закон справедлив и в том случае, когда каждая превращающаяся система образует два луча или какое-нибудь другое определенное число лучей.

Дифференцируя, получаем

$$\frac{dN_t}{dt} = -\lambda N_t,$$

т. е. скорость превращения все время пропорциональна количеству систем, еще не подвергнувшихся превращению.

Следовательно, закон радиоактивного превращения можно выразить следующим образом: относительное количество радиоактивного вещества, превращающегося в единицу времени, есть величина постоянная. Когда

общее количество вещества не изменяется (это условие приблизительно выполняется в точке равновесия, в которой скорость пополнения равна скорости превращения), то количество превращений, происходящих в единицу времени, определяется постоянной λ — характерной величиной для каждого типа активного вещества. Поэтому вполне уместно назвать величину λ «радиоактивной постоянной». Сложность явлений радиоактивности объясняется тем, что, как правило, существует несколько различных типов вещества, которые одновременно превращаются из одного в другое, причем каждый тип имеет отличную от других радиоактивную постоянную.

§ 5. Сохранение радиоактивности

Выведенный закон радиоактивного превращения годен на каждом из изученных этапов и поэтому справедлив для всего явления. Проведенные исследования показали, что радиоактивная постоянная λ не зависит от температуры в очень широком диапазоне ее изменения и не меняется под действием наиболее сильных химических и физических факторов. Тем самым этот закон в математической форме выражает общий принцип, к которому мы подошли в результате всех наших исследований. В соответствии с современными знаниями радиоактивность следует рассматривать как результат процесса, не поддающегося никакому воздействию со стороны известных нам сил, она не может быть создана, изменена или уничтожена. Подобно гравитации, она зависит только от количества участвующего вещества, и, следовательно, в этом ограниченном смысле можно назвать этот принцип сохранением радиоактивности [1]. Конечно, радиоактивность отличается от гравитации тем, что она представляет собой весьма частное, а не всеобщее свойство материи, которым обладают лишь некоторые ее виды и в очень различной степени. В радиоактивных процессах одни из этих видов превращаются в другие и в неактивное вещество; в соответствии с этими процессами меняется и радиоактивность. Таким образом,

---

[1] Этот термин, независимо от приведенных ниже рассуждений,— удобное выражение для экспериментальных фактов, заключающихся в том, что полная радиоактивность (измеряемая по излучениям радиоактивных элементов) для любой данной массы радиоактивного элемента постоянна при всех исследованных условиях. Радиоактивное равновесие может быть нарушено, а активность, содержащаяся в одном или нескольких продуктах, может быть отделена от исходного элемента. Однако суммарная величина активности во время всех этих операций остается одной и той же.

Применение термина «сохранение» *для практических целей* оправдывается тем, что за любой разумный промежуток времени, в течение которого может длиться эксперимент, доля превратившегося вещества исключительно мала. Однако, *строго говоря*, термин «сохранение» применяется только по отношению к радиоактивности некоторого постоянного количества радиоактивного вещества, тогда как в природе это количество должно непрерывно уменьшаться вследствие спонтанного превращения. Поэтому, во избежание возможных недоразумений, необходимо использовать это выражение исключительно в указанном ограниченном смысле.

уменьшение радиоактивности следует объяснять исчезновением активного вещества, а восстановление радиоактивности — его образованием. Когда эти два процесса находятся в равновесии (условие, которое почти точно выполняется, если радиоактивные элементы, находятся в замкнутом пространстве), активность остается постоянной. Но в этом случае кажущееся постоянство отражает лишь незначительную скорость превращения самого радиоактивного элемента. Через достаточно долгий промежуток времени его радиоактивность должна тоже уменьшиться в соответствии с законом радиоактивного превращения, так как в противном случае пришлось бы рассматривать радиоактивное превращение как процесс, в котором возникает вещество. Поэтому согласно современному уровню знаний общая радиоактивность во Вселенной должна уменьшаться и стремиться к исчезновению. Следовательно, энергия, высвобожденная в радиоактивных процессах, подчиняется закону сохранения энергии.

Эта точка зрения вовсе не предполагает, что радиоактивность, рассматриваемая с учетом участвующего в ней вещества, сохраняется при всех мыслимых условиях или что наверняка окажется невозможным контролировать вызывающие ее процессы. Сформулированный принцип относится, разумеется, к современному уровню экспериментальных данных и позволяет удовлетворительно их объяснить.

Основные факты, на которых базируется этот принцип, охватывают всю радиоактивность. Опыты Беккереля и Кюри показали, что излучение урана и соответственно радия остается неизменным в течение длительного времени. М. Кюри выдвинула гипотезу, по которой радиоактивность есть специфическое свойство элемента, и прямым результатом этого взгляда на радиоактивность было успешное выделение элемента радия из урановой смолки. На первый взгляд, возможность выделения из радиоактивного элемента более активной компоненты противоречит развиваемой нами теории, однако при более подробном рассмотрении этот факт лишь подтверждает ее. Во всех случаях удаляется лишь часть активности, и радиоактивный элемент через некоторое время самопроизвольно восстанавливает ее. Первоначальное утверждение М. Кюри, что радиоактивность есть специфическое свойство элемента, не подлежит сомнению. Однако если даже в конце концов будет обнаружено, что к торию и урану всегда примешаны в небольшой *постоянной* пропорции некоторые новые радиоактивные элементы, обладающие соответственно повышенной активностью, общий взгляд на эту проблему не подвергнется никаким изменениям.

Кроме того, за все время наших исследований мы не наблюдали ни одного примера возникновения радиоактивности в нерадиоактивном элементе или ее уничтожения или изменения в радиоактивном. К настоящему времени не зарегистрировано ни одного случая, в котором создание или уничтожение радиоактивности могло бы считаться доказанным. В дальнейшем мы покажем, что радиоактивное превращение по своей природе может быть лишь атомным распадом, и, следовательно, этот результат не является неожиданным, поскольку химическим путем ни разу не удалось

осуществить превращение элементов. По той же причине нельзя ожидать, чтобы на скорость радиоактивного превращения могли влиять известные нам физические или химические воздействия. Наконец, принцип сохранения радиоактивности согласуется с энергетическими соотношениями, имещими место при радиоактивном превращении, которые будут более подробно рассмотрены в § 7, где показано, что изменения энергии при радиоактивном превращении на много порядков больше, чем при молекулярном превращении.

Теперь необходимо кратко рассмотреть несколько кажущихся исклю чений из закона сохранений радиоактивности. Прежде всего следует напомнить, что различные соединения тория и радия очень сильно различаются по своей способности выделять эманацию, причем эта способность очень сильно зависит от их физического состояния. Недавние исследования показали [3], что эти различия обусловлены различием в скорости, с которой эманация улетучивается в окружающую атмосферу. Эманация образуется с одинаковой скоростью как в деэманированных, так и в интенсивно выделяющих эманацию соединениях тория и радии, но в первом случае она накапливается, или окклюдируется, в соединении. Оказалось возможным подвергнуть этот вопрос очень тщательной экспериментальной проверке, сравнивая количество накопленной эманации с количеством эманации, выделяемой ежесекундно тем же соединением, находящимся в растворенном виде. Эта проверка во всех случаях полностью подтвердила закон сохранения радиоактивности. Другим исключением является кажущееся уничтожение возбужденной активности тория, осажденной на платиновой проволоке, при ее нагревании до белого каления. Это явление в нашей лаборатории недавно исследовала Гейтс, при этом она обнаружила, что возбужденная активность не уничтожается, а улетучивается при определенной температуре и осаждается вновь в неизменном количестве на расположенных поблизости поверхностях.

Радиоактивная «индукция». Различные исследователи, работающие в данной области, объясняли полученные ими результаты радиоактивной «индукцией», наделяя радиоактивное вещество способностью возбуждать радиоактивность в нерадиоактивных телах, смешанных с этим веществом или расположенных поблизости от него. Эта теория была выдвинута Беккерелем для объяснения того факта, что некоторые осадки (особенно сульфат бария), образующиеся в растворах радиоактивных солей, сами по себе радиоактивны. Эта теория широко использовалась для объяснения многочисленных случаев радиоактивности нерадиоактивных элементов, не требуя предположения существования в них нового радиоактивного элемента. Однако наши результаты не позволяют согласиться с этой теорией.

В большинстве отмеченных примеров подобные результаты вызываются, по всей видимости, просто *смешением радиоактивного вещества с неактивным элементом.* В некоторых случаях этот эффект объясняется присутствием небольшого количества исходного радиоактивного элемента,

и тогда «наведенная» радиоактивность постоянна. В других случаях один из продуктов распада, как например уран X, или торий X, выпадает вместе с осадком, образуя временную, или, как иногда ее называют, «ложную» радиоактивность. Однако ни в одном из этих случаев первоначальный характер излучения не меняется. Возможно, что пересмотр некоторых явлений, приписывавшихся радиоактивной индукции, приведет к обнаружению новых продуктов распада известных радиоактивных элементов.

Другие результаты. Остается рассмотреть ряд случаев, в которых при обработке большого количества минералов были выделены предположительно новые радиоактивные элементы, т. е. вещества, обладающие кажущейся постоянной радиоактивностью и химическими свойствами, отличными от свойств трех известных радиоактивных элементов. К сожалению, в большинстве этих случаев не были выполнены существенные критерии — не были исследованы свойства излучений и наличие или отсутствие характерных эманаций. Химические свойства малополезны, ибо даже если новый радиоактивный элемент и присутствует, то совсем не обязательно в таком количестве, которого достаточно для его обнаружения посредством химического или спектроскопического анализа. Таким образом, радиосвинец, описанный Гоффманом и Штраусом, а также Гизелем, не может считаться новым элементом, пока не будет доказано, что он обладает постоянной и характерной активностью.

В этой связи представляет особый интерес вопрос, является ли полоний (радиовисмут) новым элементом. Полоний, открытый М. Кюри,—непостоянное радиоактивное вещество, ибо его активность медленно спадает со временем. Согласно гипотезе, выдвинутой в этой статье, полоний следует рассматривать как продукт распада одного из радиоактивных элементов, присутствующих в урановой смолке. Однако недавно Марквальд [4] получил в результате электролиза растворов урановой смолки исключительно радиоактивное вещество, очень похожее на полоний, который получила Кюри. Но он утверждает, что активность этого препарата не уменьшается со временем, а если это так, то можно с уверенностью сказать, что он и М. Кюри имеют дело с различными веществами. С другой стороны, оба препарата испускают только α-лучи, и этим они отличаются от всех других радиоактивных элементов. Марквальду удалось отделить открытое им вещество от висмута и показать тем самым, что оно обладает иными химическими свойствами, а в своей последней работе он утверждает, что отделенный от висмута продукт химически неотличим от теллура. Если будет доказано, что радиоактивность этого вещества постоянна, то существование нового радиоактивного элемента можно будет считать установленным.

Если существуют элементы, более тяжелые, чем уран, то вполне вероятно, что они окажутся радиоактивными. Исключительная чувствительность методов химического анализа, основанных на радиоактивности, позволит опознать эти элементы, даже если они будут присутствовать в нич-

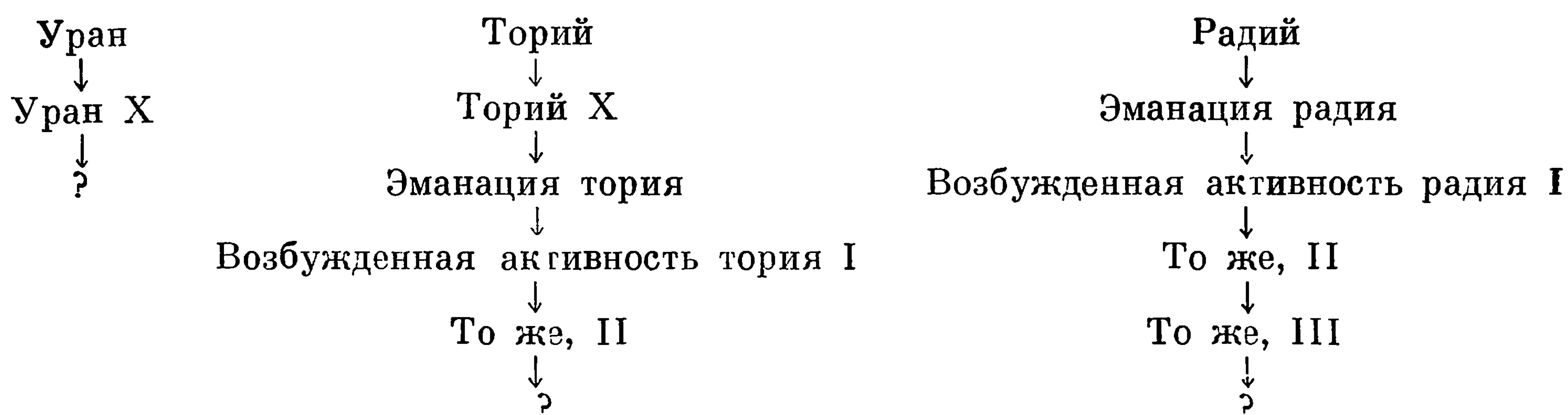
тожно малых количествах. Поэтому можно надеяться, что в будущем число известных радиоактивных элементов увеличится и что существует в незначительных количествах гораздо больше, чем три известных к настоящему времени радиоактивных элемента. Чисто химические методы исследования малопригодны на первом этапе изучения таких элементов. Основными критериями будут служить постоянство излучений, их характеристики и существование или отсутствие эманаций или других продуктов распада.

§ 6. Связь между радиоактивным и химическим превращениями

Закон радиоактивного превращения, по которому скорость превращения пропорциональна количеству вещества, претерпевающего превращение, совершенно аналогичен закону мономолекулярной химической реакции. Следовательно, радиоактивное превращение должно быть связано лишь с одной системой, так как если бы оно было связано со взаимодействием двух систем, то скорость превращения зависела бы от концентрации и закон должен был бы включать объемный фактор, что, однако, не имеет места. Поскольку радиоактивность есть специфическое свойство элемента, то превращающейся системой должен быть химический атом, а поскольку в образовании новой системы и одновременно, кроме нее, нескольких тяжелых заряженных частиц участвует только одна система, то химический атом при радиоактивном превращении должен претерпевать распад.

Из всех элементов радиоактивные элементы имеют самый большой атомный вес, и это по существу их единственно общая химическая характеристика. После распада атома и испускания тяжелых заряженных частиц, масса которых по порядку величины совпадает с массой атома водорода, образуется новая, более легкая система, химические и физические свойства которой совершенно отличны от свойств исходного элемента. Начавшийся процесс распада переходит от одной стадии к другой с определенными для каждого случая скоростями, которые поддаются измерению. На каждом этапе испускается один или более α-«лучей» пока не наступит последний этап, на котором испускается β-«луч», или электрон. Представляется целесообразным дать специальное название тем многочисленным атомам-осколкам, новым атомам, которые получаются из первоначального атома после испускания луча и которые существуют лишь ограниченное время, непрерывно претерпевая дальнейшее превращение. Их основная характерная черта — неустойчивость. С одной стороны, это не позволяет им накопиться в достаточном количестве, откуда следует, что их, по всей вероятности, никогда не удастся исследовать обычными методами. С другой стороны, неустойчивость и как ее следствие испускание лучей дают способ, посредством которого они могут быть исследованы. Поэтому мы предлагаем для этой цели термин *метаболон*. В приведенной схеме упорядочены известные в настоящее время метабо-

лоны, образующиеся при распаде трех радиоактивных элементов:



Три вопросительных знака соответствуют трем неизвестным конечным продуктам. Атомы самих радиоактивных элементов представляют собой нечто среднее между обычными атомами и метаболонами, сочетая в себе свойства и тех и других. Так, хотя они и распадаются, скорость их распада столь мала, что эти атомы могут накапливаться в количестве, достаточном для исследования химическими методами. Поскольку скорость распада радия, вероятно, в миллион раз превышает скорость распада тория или урана, мы теперь можем объяснить, почему в природных минералах радий присутствует в ничтожно малых количествах. Все эти соображения указывают на то, что атом радия — тоже метаболон в полном смысле этого слова, т. е. он образуется при распаде одного из элементов, содержащихся в минерале. По приблизительным подсчетам длительность его «жизни» не превышает нескольких тысяч лет (см. § 7). Одним из авторов этой работы сейчас проводится экспериментальное исследование этого вопроса, и более полное его обсуждение следует отложить на будущее.

В настоящее время нет никаких данных о том, что один атом или метаболон, распадаясь, может образовывать более чем один новый вид метаболона. Не существует также методов, которые позволили бы, например, обнаружить, сколько метаболонов тория X или сколько вылетевших частиц, или «лучей», образуется из одного атома тория. Поэтому проще всего предположить, что каждый атом или метаболон образует один новый метаболон, т. е. атом, и один луч. Это допущение не приведет ни к каким серьезным ошибкам, если отчетливо понимать его условный характер.

§ 7. Энергия радиоактивного превращения и внутренняя энергия химического атома

Сравнение энергетических соотношений радиоактивного и химического превращений отчетливо показывает, что в сложном строении материи химический атом есть одна из ступеней, и причем не самая низшая, сведения о которых могут быть уже сейчас получены экспериментальными методами. Пользуясь несколькими независимыми методами, можно оценить порядок величины энергии, излучаемой данным количеством радио-

активного элемента за время полного превращения, при этом результаты расчетов очень хорошо согласуются между собой. Самый прямой путь — исходить из энергии испускаемых частиц и общего числа атомов. Поскольку каждый атом при каждом превращении испускает не менее одной частицы, мы можем таким образом оценить минимальное значение полной излученной энергии. С другой стороны, один атом радиоактивного элемента, полностью распавшись, может образовать самое большее 200 таких частиц (мы предполагаем, что масса продуктов распада равна массе атома). Это рассуждение позволяет оценить максимальную возможную величину излучаемой энергии. Поскольку основная часть излучаемой энергии приходится на α-лучи, можно ограничиться только их рассмотрением.

Пусть m — масса вылетевшей частицы; v — скорость, e — заряд. Тогда для α-луча радия имеем

$$v = 2{,}5 \cdot 10^9,$$

$$\frac{e}{m} = 6 \cdot 10^3.$$

Кинетическая энергия каждой частицы

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{m}{e} v^2 e = 5 \cdot 10^{14} e.$$

Дж. Дж. Томсон показал, что

$$e = 6 \cdot 10^{-19} \text{ эл.-стат. ед.} = 2 \cdot 10^{-29} \text{ эл.-магн. ед.}$$

Поэтому кинетическая энергия каждой вылетевшей частицы равна 10^{-5} *эрг*. Предполагая, что в 1 *г* радия содержится 10^{20} атомов и что каждый атом испускает один луч, получим, что полная энергия излучения от 1 *г* радия составляет 10^{15} *эрг* $= 2{,}4 \cdot 10^7$ *кал*. Известны пять последовательных этапов распада, и на каждом этапе происходит испускание по крайней мере одного луча. Поэтому можно утверждать, что количество энергии, выделяющейся при распаде 1 *г* радия, не должно быть меньше 10^8 *кал* и может быть заключено в пределах от 10^9 до 10^{10} *кал*. Энергия излучения не обязательно равна полной энергии распада, а может составлять лишь малую ее часть, поэтому с достаточной уверенностью можно принять значение 10^8 *кал* как наименьшую вероятную величину энергии радиоактивного превращения радия. При соединении водорода и кислорода выделяется примерно $4 \cdot 10^3$ *кал* на 1 *г* образующейся воды, а ведь при этой реакции на единицу веса выделяется большее количество энергии, чем при любом другом известном нам химическом превращении. Следовательно, энергия радиоактивного превращения по крайней мере в 20 000 раз, а может быть и в миллион раз, превышает энергию любого молекулярного превращения.

Теперь можно рассмотреть скорость, с которой излучается эта энергия, а следовательно, и время жизни радиоактивного элемента. Мы мо-

жем оценить по порядку величины полную энергию, выделяющуюся каждую секунду из 1 *г* радия в виде лучей, исходя из общего количества образующихся ионов и энергии, требующейся для образования одного иона. Соль в твердом состоянии поглощает значительную часть излучения, однако эту трудность можно в значительной мере преодолеть, если определить количество ионов, образованных излучением эманации, и долю общего излучения радия, приходящегося на эманацию. В этом случае большинство частиц поглощается в воздухе, образуя при этом ионы. Экспериментально было найдено, что в большом цилиндре, наполненном воздухом, максимальный ионизационный ток, вызываемый эманацией от 1 *г* радия, активность которого превышала активность урана в 1000 раз, был равен $1{,}65\cdot10^{-9}$ *эл.-магн. ед.* Приняв $e = 2\cdot10^{-20}$, получим, что количество ионов, образующихся за 1 *сек*, равно $8{,}2\cdot10^{11}$. Эти ионы возникают в результате столкновения вылетевших частиц с частицами газа. Из экспериментов по образованию ионов при столкновении Таунсенд [5] нашел, что минимальная энергия, необходимая для получения одного иона, равна 10^{-11} *эрг*. Если мы примем, что активность чистого радия в миллион раз выше активности урана, то полная энергия, излучаемая за 1 *сек* эманацией 1 *г* чистого радия, равна 8200 *эрг*. В соединениях радия, находящихся в твердом состоянии, эта величина составляет 0,4 от общей энергии излучения, которая, таким образом, равно примерно

$$2\cdot10^{4}\ \textit{эрг/сек},$$
$$6{,}3\cdot10^{11}\ \textit{эрг/год},$$
$$15\,000\ \textit{кал/год}.$$

Это опять лишь нижняя оценка, так как принималась во внимание только энергия, затраченная на образование ионов, что может составлять малую часть полной энергии лучей.

Поскольку α-излучение всех радиоактивных элементов носит одинаковый характер, можно с достаточной обоснованностью предположить, что более слабое излучение тория и урана объясняется тем, что эти элементы распадаются с меньшей скоростью, чем радий. Энергия излучения в этих случаях составляет примерно 10^{-6} от энергии, излучаемой радием, и равна, следовательно, примерно 0,015 *кал* в год. Разделив эту величину на общую энергию излучения $2{,}4\cdot10^{7}$ *кал*, получим в качестве максимальной оценки относительного количества урана или тория, претерпевающего превращение за год, величину $6\cdot10^{-10}$. Следовательно, в 1 *г* этих элементов за миллион лет подвергнется превращению менее 1 *мг* вещества. Но если мы возьмем радий, то такое его количество распадется за *один год*. Из этих заниженных оценок, основанных на допущении, что каждая частица при превращении испускает один луч, следует, что «длительность жизни» радия не может превышать нескольких тысяч лет. Если при каждом превращении испускается больше одной частицы, то время жизни будет соответственно больше, однако максимальное значе-

ние вряд ли может превышать найденное более чем в 50 раз. Поэтому можно определенно думать, что радий, присутствующий в минералах, непрерывно образуется в процессе радиоактивного превращения и что его возраст меньше, чем возраст самого минерала.

В заключение можно оценить количество лучей, образующихся ежесекундно из 1 *г* радиоактивного элемента. Поскольку энергия одного «луча» составляет 10^{-5} *эрг*, или $2{,}4 \cdot 10^{-13}$ *кал*, то 1 *г* урана испускает за год $6 \cdot 10^{10}$ лучей. Это примерно 2000 лучей в 1 *сек*. По-видимому, с помощью электрического метода можно регистрировать α-излучение от 1 *мг* урана в 1 *сек*. Таким образом, экспериментальные методы позволяют исследовать распад чуть ли не одного атома, тогда как взвешиванием нельзя зарегистрировать уран в количестве, меньшем 10^{14} атомов.

Как уже указывалось, эти оценки касаются лишь энергии излучения, а не полной энергии радиоактивного превращения, которая, в свою очередь, может составлять лишь часть от внутренней энергии атома, так как внутренняя энергия образующихся продуктов остается неизвестной. Все эти рассмотрения приводят к выводу, что энергия, скрытая в атоме, во много раз больше энергии, освобождающейся при обычном химическом превращении. По своему химическому и физическому поведению радиоактивные элементы никак не отличаются от других элементов. С одной стороны, они очень близки по химическим свойствам к своим прототипам в периодической системе, с другой стороны, у них нет никаких химических признаков, которые можно было бы связать с их радиоактивностью. Поэтому нет оснований предполагать, что только атомы радиоактивных элементов обладают такой огромной внутренней энергией. По всей вероятности, энергия атома вообще очень велика, однако в отсутствие превращений она не может проявиться. Большая величина внутренней энергии атома объясняет устойчивость химических элементов, а также сохранение радиоактивности при всевозможных условиях. Ее следует учитывать при объяснении явлений космической физики. Например, легко объяснить постоянство солнечной энергии, если предположить, что она обусловливается внутренней энергией элементов, составляющих Солнце, т. е. что на Солнце идут процессы субатомного превращения. Интересно отметить, что Н. Локьер [6] интерпретирует результаты своих спектроскопических исследований именно на основе последней точки зрения, хотя считает, что причиной этих превращений является скорее температура, нежели радиоактивные процессы.

Мак-Гиллский университет, Монреаль

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rutherford E.* Phil. Mag., February, 1903.
2. *Rutherford E.* Phys. Zs., 1902.
3. *Rutherford E.* Phil. Mag., April, 1903, 453.
4. *Marckwald.* Ber. Dtsch. chem. Ges., 1902, 2285, 4239.
5. *Townsend. J. S.* Phil. Mag., 1901, 1.
6. *Lockyer N.* Inorganic Evolution, 1900.

1904

16

ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ ЭМАНАЦИИ РАДИЯ *

(Совместно с Г. Барнсом)

П. Кюри и Лаборд [1] первыми наблюдали высокую скорость выделения тепла из радия и определили, что 1 *г* радия излучает теплоту со скоростью около 100 *кал/час*. В более поздней работе П. Кюри [2] нашел, что скорость выделения тепла зависит от возраста препарата радия. Тепловой эффект свежеприготовленного соединения радия сначала невелик, но затем постепенно увеличивается, достигая максимума через месяц, и не изменяется в течение последующих двух месяцев.

Целью настоящих экспериментов было определить, как связаны между собой тепловое излучение радия и его радиоактивность. Резерфорд и Содди [3] показали, что излучение, испускаемое соединением радия, находящимся в состоянии теплового равновесия, может быть разделено на три части:

1) неотделимое излучение, которое состоит исключительно из α-лучей и составляет 25% от общего излучения;

2) излучение от эманации, окклюдированной радием, которое также состоит только из α-лучей;

3) возбужденное излучение, создаваемое эманацией в массе радия и состоящее из α-, β- и γ-лучей.

Вторая и третья части составляют около 75% от общего излучения.

Недавно был проведен ряд экспериментов для определения того, какая часть активности радия создается окклюдированной в нем эманацией. С помощью электрометра определялась величина тока насыщения между двумя пластинами, вызванного препаратом радия, равномерно распределенным на поверхности платиновой пластинки. Затем платиновая пластина была быстро нагрета до температуры, при которой происходит полное выделение эманации, после чего сразу же был измерен ионизационный ток, создаваемый радием. Ионизационный ток уменьшился на 18% от общей величины. Постепенный спад возбужденной активности, оставшейся в радии после удаления эманации, изображен графически на рис. 5.

Таким образом, можно заключить, что эманация создает 18%, неотделимая активность — 25% и возбужденная активность — 57% общей активности радия.

---

* Philosophical Magazine, February. 1904, ser. 6, 7, 202—219. Предварительные результаты были опубликованы в Nature, October 29, 1903, 622. Доложено Американскому физическому обществу 29 декабря 1903 г. в г. Сент-Луисе.

Было показано, что возбужденная активность обусловлена осаждением радиоактивного вещества на поверхности тел. Термин «возбужденная активность» относится только к излучению этого активного вещества. Удобно иметь какое-нибудь определенное название для самого этого вещества. Мы предлагаем назвать его «эманацией X», так как само вещество, вызывающее возбужденную активность, образуется непосредственно из эманации. Это название дано по аналогии с продуктами UX и ThX, которые образуются из урана и тория. Согласно этой терминологии, радий с постоянной скоростью образует эманацию, которая, в свою очередь, превращается в эманацию X. Вещество эманации X радия само претерпевает по меньшей мере три, а возможно и четыре превращения. Природа этих превращений и их связь с радиоактивностью будут рассмотрены ниже.

При нагревании или растворении соединения радия в открытом сосуде эманация освобождается и может быть полностью удалена потоком воздуха. При этом нелетучая эманация X остается в радии и сразу же начинает терять свою активность. В течение нескольких часов ее активность практически исчезает. Образуемые только эманацией X β- и γ-лучи исчезают из радия за то же время, после чего остается только неотделимая активность радия, состоящая из α-лучей.

Одновременно с превращением эманации X, оставшейся в радии, из отделенной эманации происходит образование новой эманации X, причем с такой скоростью, что в любой момент времени активность эманации X, оставшейся в радии, в сумме с активностью эманации X, образующейся заново из эманации. равна первоначальной активности эманации X, запасенной в радии.

Поскольку радий постоянно образует новую эманацию, которая окклюдируется в нем, то его активность постепенно увеличивается и в течение примерно месяца почти достигает своей первоначальной постоянной величины.

Описываемые здесь эксперименты должны были выяснить, изменяется ли тепловыделение радия при удалении эманации по такому же закону, что и его активность. Для этого сначала был определен тепловой эффект радия. Затем от него была отделена эманация и сконденсирована в небольшой стеклянной трубке. После этого было определено, как распределяется тепловое излучение между эманацией, эманацией X и радием, а также как изменяется в зависимости от времени тепловой эффект эманации и радия, от которого она была отделена.

Описание аппаратуры

Поскольку мы имели в своем распоряжении для опытов всего 30 *мг* чистого бромида радия, то пришлось разработать специальные методы для точного измерения незначительных тепловых эффектов. Максимальное тепловое излучение от 30 *мг* бромида радия не превышает $6 \cdot 10^{-4}$ *кал/сек*,

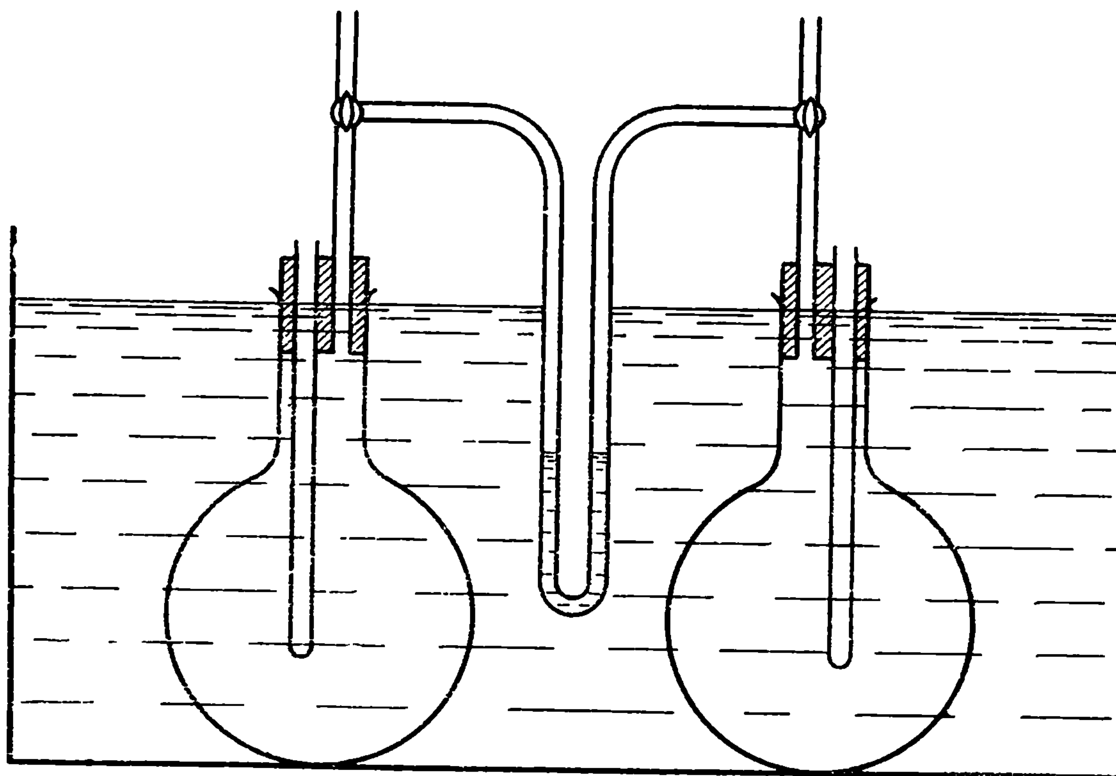


Рис. 1

и необходимо было измерить с достаточной точностью тепловое излучение, составляющее по крайней мере 1/20 от этой величины.

В описанных ниже экспериментах применялся дифференциальный воздушный калориметр простой конструкции. На рис. 1 изображена упрощенная схема этого прибора. Он состоял из двух колб вместимостью 1 *л* каждая, снабженных резиновыми пробками со вделанными в них стеклянными трехходовыми кранами, и из трубок, в которые можно было помещать радий или трубочку с эманацией. Через стеклянные краны воздух в колбах сообщался либо с атмосферным воздухом, либо с манометрической трубкой, с помощью которой регистрировалась разность давлений в колбах. Сначала мы встретились с некоторыми трудностями при выборе подходящей жидкости для манометрической трубки; жидкость должна была иметь достаточную подвижность и низкое давление паров. В конце концов мы остановились на ксилоле, который удовлетворял всем требованиям. Разница уровней ксилола в двух плечах наблюдалась через микроскоп, снабженный окулярным микрометром и установленный на подставке катетометра. Обе колбы были погружены в ванну с водой при постоянной температуре и там оставались в неподвижном состоянии в течение всего опыта. Вначале измерялся уровень ксилола в манометрической трубке при введении в колбу трубки с радием или с эманацией, затем радиоактивное вещество переносили в другую колбу и повторяли измерение. В обоих случаях измерения проводились по истечении времени, достаточного для установления равновесия. Чтобы откалибровать показания шкалы микрометра непосредственно в *кал/час* были изготовлены две катушки из манганиновой проволоки, сопротивлением около 50 *ом* каждая. Одна из них была сделана очень компактной и имела объем, примерно равный объему использовавшихся 30 *мг* бромида радия, а другая катушка содержала большое количество витков, намо-

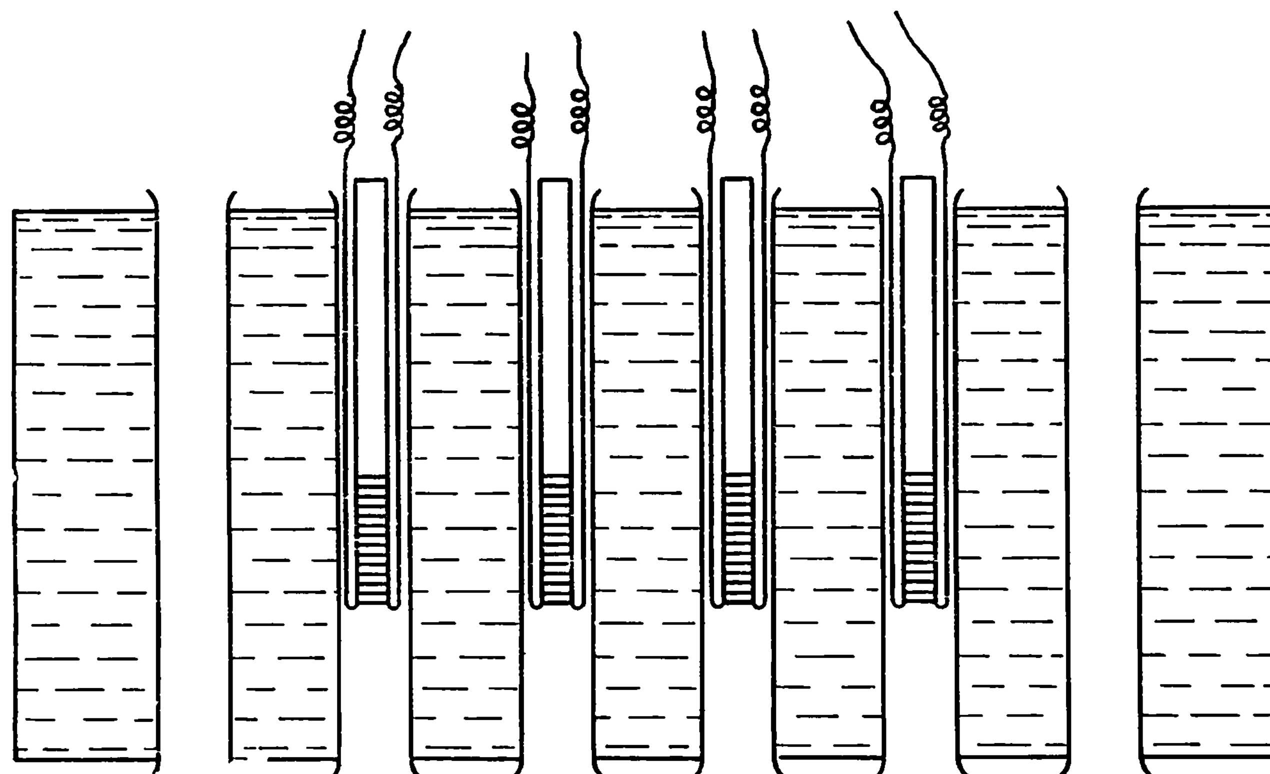


Рис. 2

танных на каркасе той же формы, что и трубка с эманацией. Через эти нагревательные катушки пропускали ток определенной величины и соответствующую ему разность давлений измеряли с помощью манометра. Таким образом были получены две несколько отличающиеся одна от другой калибровочные кривые, которые с максимально доступной нам точностью характеризовали оба источника тепла. Дифференциальный манометр очень подходил для первых наблюдений, длящихся несколько недель, и был весьма удобен для измерения величины теплового излучения, однако вследствие своей большой массы и большого объема содержащегося в нем воздуха он был слишком инерционен и не способен регистрировать важные начальные превращения. Поэтому были изготовлены две пары чувствительных платиновых термометров с внутренними катушками, имевших время запаздывания не более 6—7 *мин.* Эти термометры позволили нам одновременно работать с радием и эманацией, что очень важно для изучения первых превращений.

Каждый термометр состоял из 35 *см* тонкой платиновой проволоки, аккуратно навитой внутри тонкостенной стеклянной трубки диаметром 5 *мм.* Чтобы закрепить проволоку, трубка была осторожно нагрета докрасна так, что проволока прочно соединилась со стеклом, образовав катушку длиной около 3 *см.* Концы катушки были припаяны золотом к массивным подводам из платиновой проволоки. Трубка, содержащая радий, как и трубка, содержащая эманацию, могла легко вдвигаться внутрь катушки, поэтому проволока непосредственно соприкасалась со стеклянной трубкой, содержащей источник тепла.

Каждый термометр был установлен по центру стеклянной трубки большего размера, проходящей через длинную узкую водяную ванну (рис. 2). Помещенная в ванне мешалка поддерживала однородность температуры. Когда трубка с эманацией или с радием перемещалась из од-

ного термометра в другой, измерялось изменение сопротивления термометров с помощью весьма тщательно изготовленного компенсированного моста Коллендера, который описан одним из авторов в работе [4]. Измерения проводились с помощью верньерной шкалы, позволявшей производить отсчет с точностью до $^1/_{100}$ *мм*. Максимальная разница сопротивлений несколько превышала 7 *мм* и соответствовала разнице температур примерно $^3/_{10}$° С, т. е. температуру можно было измерять с точностью в одну сотую этой величины. Мы не стремились к абсолютным измерениям выделяющейся теплоты, так как нас интересовали только начальные участки кривых, для которых требовались лишь относительные величины. Однако для проверки мы прокалибровали одну пару термометров и оказалось, что величина теплового излучения чистого бромида радия очень хорошо совпадает с величиной, измеренной с помощью воздушного калориметра. Эта величина немного превышает 100 *кал/час* на 1 *г* чистого радия, что очень хорошо согласуется с результатами, полученными Кюри и Лабордом и позднее Рунге и Прехтом [5].

Измерение радиоактивности

В экспериментах эманацию отделяли от радия с помощью нагревания, а затем конденсировали в небольшой стеклянной трубке, погруженной в жидкий воздух. Было важно знать, какая часть эманации, выделяющейся при нагревании, конденсируется в трубке. Это было сделано следующим образом.

Трубка, содержащая радий, была помещена за свинцовым экраном толщиной 5 *см*, рядом с цилиндрическим металлическим электроскопом, в котором использовалась система золотых лепестков, изолированная бусинкой из серы по методу, примененному впервые Ч. Т. Р. Вильсоном. Скорость движения заряженных золотых лепестков измерялась с помощью микроскопа с окулярным микрометром. Наблюдавшаяся высокая скорость движения золотых лепестков обусловливается γ-лучами радия, прошедшими через свинцовый экран толщиной 5 *см*. Предварительные опыты, проделанные одним из авторов, показали, что γ-излучение радия всегда сопровождает β-излучение и по величине пропорционально ему. Если радий полностью обезгажен, то через некоторое время, достаточное для распада возбужденной активности, γ-излучение, как и β-излучение, полностью исчезает. Если через 4 или 5 *час* после обезгаживания радия оказывается, что скорость разряда составляет более 1—2% от первоначального значения, измеренного по γ-лучам, то это означает, что часть эманации не удалена [1]. В этом случае количество оставшейся эманации прямо пропорционально γ-излучению, так как возбужденная активность

[1] При первом нагревании бромида радия до температуры, значительно ниже температуры красного каления, эманация выделялась полностью. При втором прокаливании после восстановления активности радия выделялось только 75% окклюдированной эманации.

и, следовательно, остающееся излучение через 4—5 *час* практически пропорциональны количеству присутствующей эманации. Если не произошло потерь эманации, то γ-излучение радия и трубочки с эманацией в сумме должны быть равны γ-излучению исходного радия. Если это не так, то это показывает, что часть эманации теряется внутри насоса, и величина утечки может быть рассчитана по изменению скорости разряда электроскопа. Эти измерения проводились с достаточной быстротой и точностью и служили для определения количества эманации в сосуде. Необходимо помнить, что γ-излучение может служить мерой количества эманации лишь по истечении некоторого времени (вполне достаточно 3—4 *час*), чтобы эманация и ее продукт эманация X приблизилась к состоянию радиоактивного равновесия. Сразу же после введения эманации в сосуд ни β-, ни γ-излучения не наблюдается, но через 45 *мин* интенсивность β- и γ-излучения достигает примерно половины своей максимальной величины.

Описание экспериментов

Тепловой эффект 30 *мг* бромида радия, заключенного в узкую стеклянную трубку, был сначала определен с помощью воздушного калориметра. Затем трубка *R* с радием (рис. 3) через трубку *A* с пятиокисью фосфора была присоединена к узкой короткой стеклянной трубке *T* длиной около 3 *см*, соединенной с ртутным насосом *P*. Трубка *T* проходила через небольшой эбонитовый сосуд с жидким воздухом, чтобы сконденсировать любую проходящую через нее эманацию.

В сосуд залили жидкий воздух, а трубки частично откачали. Затем, чтобы выделилась вся эманация, радий был нагрет[1] на спиртовке. Образовывавшийся при этом водяной пар поглощался в трубке *A*, а эманация

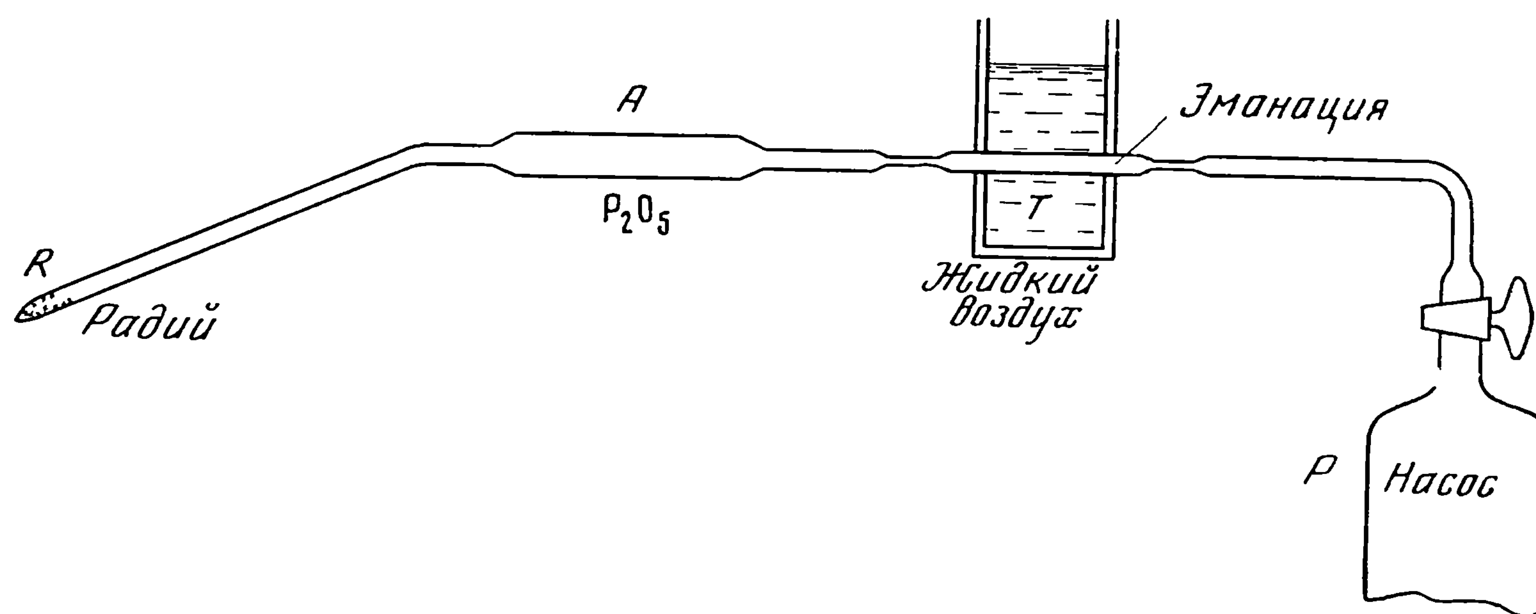


Рис. 3

[1] Когда радий был нагрет до красного каления, в нем возникла очень сильная фосфоресценция. Свечение было настолько ярким, что было заметным при обычном дневном свете и длилось несколько дней. Его спектр, который оказался непрерывным, был любезно сфотографирован для нас Шенком.

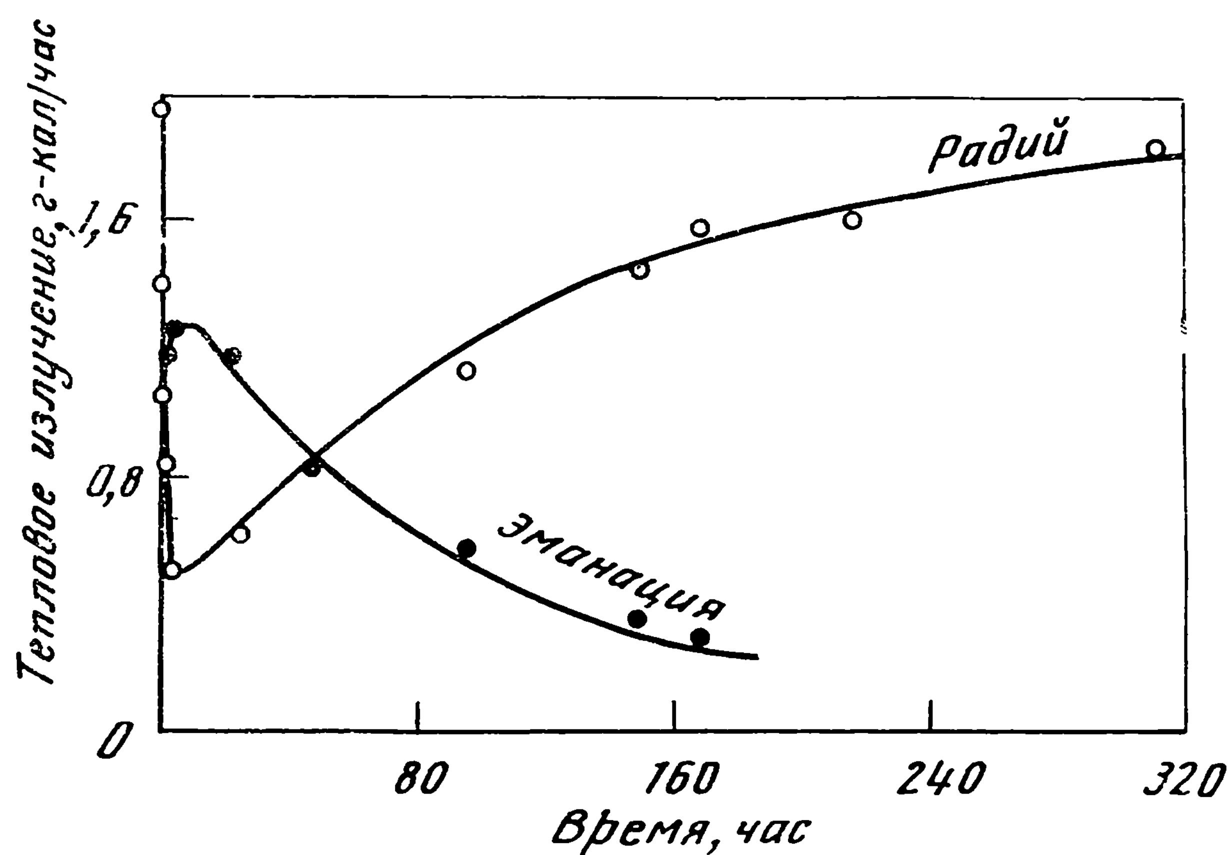


Рис. 4

конденсировалась в трубке T. Вся выделившаяся эманация конденсировалась в трубке T при медленно работающем насосе P. Затем трубка T и трубка, содержавшая радий, были отпаяны, и тепловой эффект каждой из них был сразу же измерен на воздушном калориметре. Полученные результаты показаны на рис. 4. Тепловой эффект радия сначала быстро падает в течение примерно 3 *час*, а потом достигает минимума, составляющего около 30% первоначальной величины. В то же время эманация обнаруживает значительный тепловой эффект, который увеличивается на протяжении примерно 3 *час*, после чего достигает максимума. Достигнув минимума, тепловой эффект радия начинает постепенно восстанавливаться и достигает первоначальной величины примерно через месяц. Тепловой эффект трубки с эманацией постепенно уменьшается со временем по экспоненциальному закону, спадая вдвое примерно за 4 дня.

В пределах экспериментальных ошибок общая сумма теплового действия радия и теплового действия трубки с эманацией в течение всего эксперимента все время равна величине теплового действия исходного радия. Измерения радиоактивности показали, что в описанном выше опыте около 6% эманации при нагревании не выделилось из радия. Эти результаты позволяют сделать вывод, что около 75% теплового эффекта радия обусловлены не непосредственно радием, а эманацией и образующейся из нее эманацией X. Существует тесная связь между изменением радиоактивности радия и скоростью его теплового излучения. После отделения эманации активность радия спадает в течение нескольких часов до минимума, составляющего примерно 25% ее исходного значения, а затем снова постепенно возрастает. Активность, обусловленная эманацией (при наблюдении в закрытом сосуде), увеличивается со временем вследствие возбуж-

денной активности, создаваемой эманацией на стенках сосуда. Кривые восстановления теплового эффекта радия и постепенного уменьшения теплового эффекта эманации почти в точности совпадают с соответствующими кривыми восстановления активности радия и уменьшения со временем активности, отделенной от него. Тепловое излучение эманации, как и ее активность, ослабевает вдвое примерно за 4 дня. За такой же промежуток времени спонтанно восстанавливается примерно половина теплового эффекта, а также половина активности деэманированного радия. Таким образом, кривая уменьшения теплового действия трубки с эманацией выражается уравнением

$$\frac{Q_t}{Q_0} = e^{-\lambda t},$$

где Q_t — тепловое излучение в момент времени t; Q_0 — его максимальное значение.

Величина теплового излучения Q_t радия в любой момент времени после достижения минимума выражается уравнением

$$\frac{Q_t}{Q_0} = 0{,}25 + 0{,}75\,(1 - e^{-\lambda t}),$$

где Q_0 — максимальное значение излучения; λ — прежняя константа. Те же числовые константы и такое же уравнение были получены и для кривой восстановления активности деэманированного радия, измеренной по α-лучам [3].

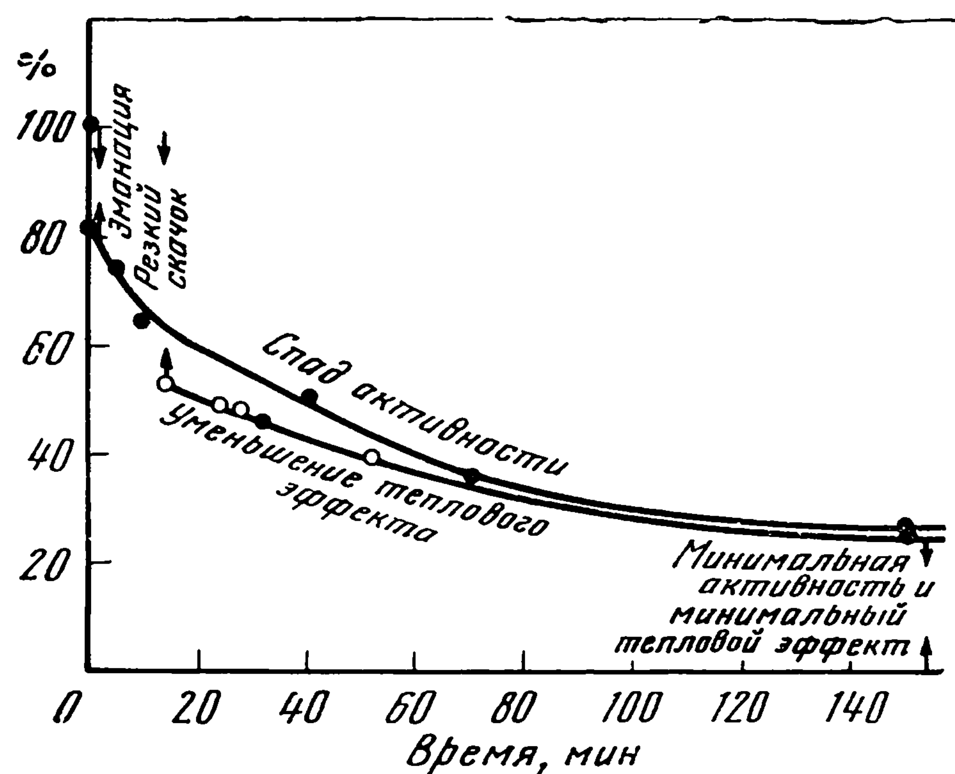
Полученные к настоящему времени результаты полностью согласуются с представлением, согласно которому тепловое действие радия в любой момент пропорционально его активности, измеренной по α-лучам, или, другими словами, тепловое излучение радия сопровождает испускание α-частиц. Тепловое излучение не пропорционально β- или γ-излучению, так как в ходе эксперимента после частичного деэманирования радия величина β- и γ-излучения, оставшегося в радии, составляла лишь 6% общей величины, тогда как тепловой эффект составлял около 30% общей величины.

Тем не менее этих экспериментов еще недостаточно, чтобы можно было сделать заключение, что во всех случаях испускание α-частиц сопровождается тепловым излучением, величина которого пропорциональна их числу. Помимо этого необходимо еще показать, что эманация и эманация X выделяют тепло пропорционально своей активности, измеренной по α-лучам, и что тепловой эффект каждого из ряда превращений эманации X всегда пропорционален его активности, измеренной по α-лучам.

Уменьшение теплового эффекта радия непосредственно после его деэманации

Описанный выше воздушный калориметр не позволяет достаточно быстро регистрировать изменение теплового излучения деэманированного радия или эманации непосредственно после ее выделения. Для этой цели использовались описанные ранее платиновые термометры. Эманация конденсировалась в небольшой стеклянной трубке длиной 3 *см* и внутренним диаметром 3 *мм*. Так как эти опыты имели целью определить начальный спад теплового действия радия, то нагревание радия и конденсация эманации проводились лишь в течение нескольких минут. Вследствие этого незначительное количество эманации попадало в насос и не конденсировалось в трубке. Затем трубку с радием быстро помещали в воздушную ванну и сразу же после охлаждения проводили измерение ее теплового эффекта. Результаты показаны на рис. 5. Примерно через 10 *мин* после удаления эманации тепловой эффект радия уменьшился до 45% первоначальной величины. Затем он спадает медленнее и достигает минимума, составляющего около 25% начальной величины.

Постепенный спад теплового действия до минимума связан с уменьшением активности остающейся эманации X. Таким образом, кривая спада теплового эффекта радия до минимума должна иметь такой же вид, как кривая спада до нуля теплового эффекта трубки, из которой удалена находившаяся в ней эманация. Эманацию выдержали в этой трубке 4—5 *час*, так что возбужденная активность на стенках трубки практически достигла максимума. Затем концы трубки были сломаны, а эманация быстро удалена. После этого через регулярные промежутки времени измерялся тепловой эффект в этой трубке. Результаты показаны на рис. 6 (нижняя кривая). В первые 10 *мин* после удаления эманации тепловой



Гис. 5

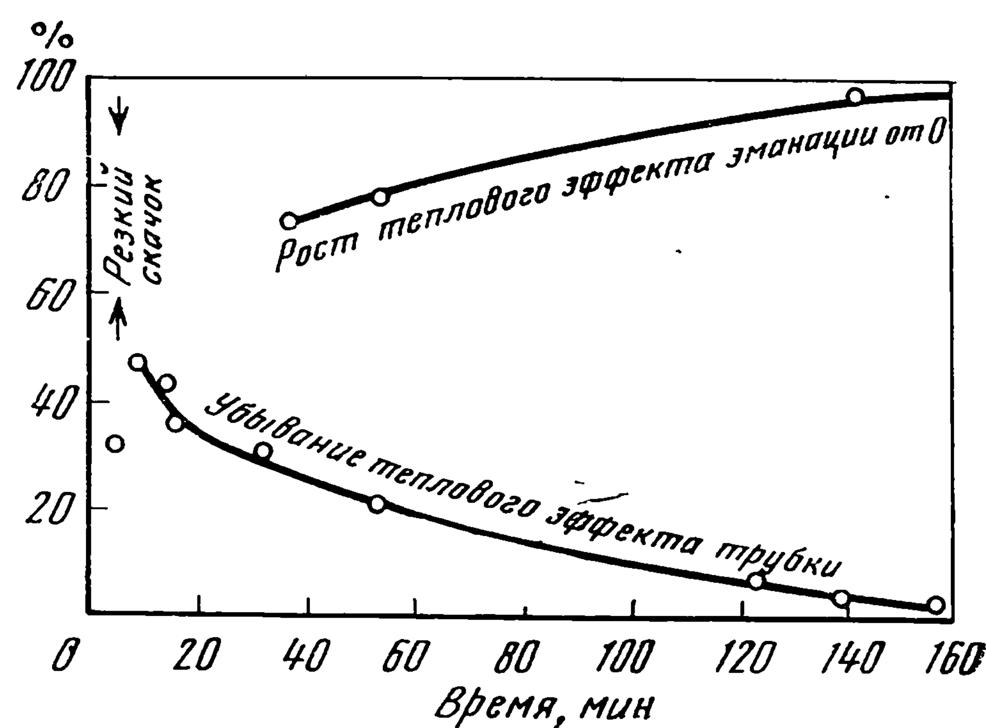


Рис. 6

эффект падал быстро, затем медленнее и, наконец, стал уменьшаться со временем примерно по экспоненциальному закону, спадая вдвое приблизительно за каждые 30 *мин*. Кривая уменьшения теплового действия до нуля имеет почти тот же вид, что и кривая спада теплового действия радия до минимального значения.

Увеличение теплового излучения после введения эманации в трубку

Если общая скорость теплового излучения не изменяется при отделении эманации от радия, то кривая, изображающая возрастание теплового эффекта трубки с эманацией, должна быть дополнительной по отношению к кривой, соответствующей уменьшению теплового эффекта радия после удаления эманации. Это было подтверждено на опыте, результаты которого представлены верхней кривой на рис. 6[1]. Поскольку во время конденсации трубка с эманацией охлаждалась до температуры жидкого воздуха, то измерение ее теплового эффекта не может быть начато через такой же короткий промежуток времени, как в том случае, когда эманация удаляется без изменения температуры. Тем не менее результаты показали, что через 35 *мин* после введения эманации в трубку тепловое действие трубки с эманацией составляет почти 75% конечной величины. В серии экспериментов кривая возрастания теплового действия трубки с эманацией и кривая убывания теплового действия трубки после удаления эманации оказывались дополнительными одна к другой. Если кривые построены в одном и том же масштабе, то в любой момент времени сумма ординат этих кривых будет постоянной величиной.

Обсуждение результатов

На рис. 5 и 6 показано, что тепловой эффект радия и трубки с эманацией скачкообразно падает после удаления эманации. Для сравнения рядом с кривой убывания теплового действия радия построена кривая спада активности радия после удаления эманации (см. рис. 5, верхняя кривая). Видно, что сразу же после удаления эманации происходит резкий спад активности до 82% максимальной величины. Это показывает, что излучение эманации составляет примерно 18% общей активности радия, измеренной по α-лучам. Далее следует довольно быстрое убывание в течение 6—8 *мин*, а затем более медленный спад до минимального значения, составляющего 25% максимального. Это быстрое изменение возбужденной активности в течение нескольких первых минут вызвано тем, что первое превращение эманации X происходит очень быстро. Первое превращение проявляется особенно отчетливо, если в *течение очень короткого времени* подвергнуть

[1] Получены три набора кривых, показывающих увеличение теплового эффекта после введения эманации и убывание теплового эффекта после удаления эманации. Во всех случаях эти кривые хорошо совпадали.

действию эманации радия какой-нибудь стержень. После удаления стержня его активность вначале очень быстро уменьшается и примерно за 3 *мин* падает наполовину. Упав до уровня ниже 20% максимальной величины, активность в течение примерно 25 *мин* меняется очень незначительно, после чего следует постепенное убывание до нуля [6].

П. Кюри и Данн [7] показали, что спад активности тела, длительно подвергавшегося воздействию эманации, описывается уравнением

$$\frac{I_t}{I_0} = ae^{-\lambda_1 t} - (a - 1)\,e^{-\lambda_2 t},$$

где I_t — активность в момент времени t; I_0 — активность непосредственно после удаления; $\lambda_1 = {}^1/_{2420}$; $\lambda_2 = {}^1/_{1860}$; $a = 4{,}20$; за единицу времени принимается секунда.

Кюри и Данн утверждают, что это уравнение справедливо в любой момент времени, однако нельзя сомневаться в том, что существует быстрый начальный спад, происходящий в течение первых 10 *мин* после удаления тела из эманации, и он этим уравнением не описывается. Тем не менее это уравнение будет соблюдаться, если измерения активности начинаются приблизительно через 10 *мин* после удаления, так как к этому времени первое превращение почти заканчивается. Это уравнение с теми же ограничениями описывает убывание активности эманации X, остающейся в радии после удаления эманации.

Анализ кривых распада возбужденной активности, образующейся за разное время под действием эманации, показывает, что эманация X радия претерпевает три отчетливо выраженных превращения. В первом превращении половина вещества превращается за 3 *мин*, во втором — за 34 *мин*, в третьем — за 28 *мин*. Полное описание этих превращений будет дано одним из авторов в следующей работе. Первое превращение сопровождается исключительно α-излучением, при втором превращении α-лучей *нет совсем*, третье превращение сопровождается α-, β- и γ-излучением.

Несмотря на то, что кривые убывания теплового излучения и активности радия очень схожи по виду, непосредственно из полученных результатов нельзя сделать заключение о том, в какой степени сравнительно быстрый спад теплового действия вызывается эманацией, а в какой — первым превращением эманации X, так как первое превращение эманации X происходит очень быстро. Активность первого превращения эманации X за 10 *мин* уменьшается примерно до 10% своей начальной величины (вдвое — за 3 *мин*). Поэтому первые надежные измерения теплового эффекта радия и трубки с эманацией могут быть проделаны не ранее чем через 10 *мин* после удаления эманации. Необходимо выждать по меньшей мере 5 *мин*, чтобы стеклянная оболочка нагрелась до температуры, соответствующей находящемуся внутри нее источнику тепла.

Вследствие быстрого начального превращения эманации X мы можем из опытов сделать лишь тот вывод, что около 41% общего теплового эф-

фекта радия обусловлено совместным действием эманации и первого превращения эманации X. Все остальные результаты показывают, что тепловой эффект всегда сопровождает испускание α-лучей; например, минимальное тепловое действие деэманированного радия составляет 25% общей величины, причем его активность составляет также 25% общей активности и состоит только из α-лучей. Излучение эманации, а также излучение, обусловленное первым превращением эманации X, полностью состоит из α-лучей, и почти не подлежит сомнению, что эманация создает тепловой эффект такого же порядка величины, что и в других превращениях, сопровождаемых α-излучением. Сейчас проводятся дальнейшие эксперименты, имеющие целью отделить тепловое действие эманации от теплового действия, обусловленного первым превращением эманации X.

Убывание теплового эффекта возбужденной активности после первого резкого спада идет сначала не особенно быстро, и в этом отношении это очень похоже на спад возбужденной активности. Таким образом, представляется вероятным, что второе превращение эманации X, при котором не испускаются α-лучи, не сопровождается таким же тепловым излучением, какое наблюдается в других превращениях. В настоящее время ведутся дальнейшие эксперименты для выяснения этого вопроса.

Таким образом, тепловое излучение радия, находящегося в состоянии радиоактивного равновесия, можно систематизировать в таблице.

Активные продукты	Характер излучения	Величина активности, измеренной по α-лучам, %	Тепловой эффект, % от общей величины
Радий (свободный от радиоактивных продуктов)	α-лучи	25	25
↓ Эманация	α-лучи	18 } 33	41
↓ Эманация X (первое превращение)	α-лучи	15	
↓ Второе превращение	Нет α-лучей	0 } 42	34
↓ Третье превращение	α-, β- и γ-лучи	42	

Хотя экспериментальные данные недостаточно полны, чтобы дать определенный ответ на вопрос о том, пропорционально ли тепловое действие каждого из этих продуктов его α-активности, полученные результаты показывают, что приблизительное соответствие действительно имеет место. Тепловой эффект, несомненно, прямым образом связан с радиоактивностью радия, и изменение теплового действия каждого из радиоактивных продуктов во времени имеет тот же характер, что и изменение со време-

нем активности. Этот результат показывает, что тепловое излучение радия сопровождает происходящие в нем последовательные превращения.

Остается еще выяснить, какая часть теплового излучения радия обусловлена кинетической энергией α-частиц, а какая — атомными системами, из которых они вылетают. В достаточно массивном препарате радия почти все испускаемые им лучи поглощаются самим радием. Таким образом, радий подвергается интенсивной бомбардировке своими собственными α-частицами. Несомненно, что некоторая часть теплового эффекта радия обусловлена этой бомбардировкой, но возможно также, что частично он возникает за счет энергии, излучаемой при перегруппировке составных частей атомов, испустивших α-частицы. Нельзя ожидать, что распределение теплоты между двумя системами будет одинаковым для всех активных продуктов и что тепловой эффект каждого продукта окажется пропорциональным его активности, измеренной по α-лучам.

В этих экспериментах по изучению теплового эффекта α-лучи во всех случаях поглощались стеклянной оболочкой, и их тепловое действие, таким образом, складывалось с тепловым действием систем, из которых они возникли. Бóльшая часть β-лучей и почти все γ-излучение не задерживались стеклом. Однако в работе [8] было показано, что энергия, излучающаяся в форме β- и γ-лучей, составляет, по всей вероятности, лишь небольшую часть энергии, испускаемой в виде α-лучей.

Количество теплоты, выделяемое эманацией

Как было показано, тепловое действие эманации в совокупности с тепловым действием ее активного продукта составляет приблизительно 75% общего теплового излучения радия. Так как 1 *г* радия излучает тепло со скоростью 100 *кал/час*, то эманация 1 *г* радия в состоянии радиоактивного равновесия через несколько часов после отделения будет выделять теплоту со скоростью 75 *кал/час*. Тепловое излучение в любой момент времени после достижения максимума выражается формулой

$$\frac{Q_t}{Q_0} = e^{-\lambda t},$$

поэтому общее количество теплоты, выделяемое эманацией от 1 *г* радия, равно

$$\int_0^\infty Q_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{Q_0}{\lambda}.$$

Поскольку тепловое действие эманации уменьшается наполовину примерно за 3,73 дня, то $\lambda = 0{,}0077$, если за единицу времени принять час. Тем самым общее количество теплоты, выделяемое эманацией от 1 *г* радия, составит примерно 10 000 *кал*. Ранее было показано [9], что объем эманации.

выделяемой 1 *г* радия, лежит между $6 \cdot 10^{-4}$ и $6 \cdot 10^{-5}$ *см*^{3} при нормальном давлении и комнатной температуре. Таким образом, количество теплоты, освобождающейся из 1 *см*^{3} эманации за час, находится в пределах между $1{,}25 \cdot 10^5$ и $1{,}25 \cdot 10^6$ *кал*. Этого количества теплоты, по всей видимости, будет достаточно, чтобы накалить докрасна, если не расплавить, стеклянную трубку, в которой она содержится.

Эманация ведет себя так, как если бы она была газом с большим молекулярным весом. Если принять, что молекула эманации в 100 раз тяжелее молекулы водорода, то можно легко подсчитать, что 1 *г* эманации радия, претерпевая всю последовательность превращений, излучает энергию, заключенную в пределах от $2 \cdot 10^9$ до $2 \cdot 10^{10}$ *кал*. Один фунт эманации испускал бы в самом начале энергию со скоростью 10^4—10^5 *л. с.*, а за все время выделил бы энергию $6 \cdot 10^4$ — $6 \cdot 10^5$ *л. с.·день*.

Примерно такой же результат получается, независимо от каких бы то ни было предположений, из измерений теплового эффекта эманации и из того факта, что эманация образуется в очень малых количествах, вес и объем которых до сих пор не может быть измерен.

Нет сомнений в том, что при специальных условиях это вещество способно выделить количество энергии, которое во много раз превосходит энергию, выделяемую при самых бурных химических реакциях. Согласно гипотезе распада [10], эта энергия выделяется из энергии, скрытой в атомах радия, и освобождается на последовательных этапах их распада.

Мак-Гиллский университет, Монреаль,
22 декабря 1903 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Curie P.*, *Laborde*. Compt. Rend., 1903, **136**, 673.
2. *Curie P.* Science de Physique, 1903.
3. *Rutherford E.*, *Soddy F.* Phil. Mag., April, 1903.
4. *Barnes. H. T.* Philos. Trans., 1902, **199**, 185.
5. *Runge*, *Precht*. Sitzungsber. Akad. Wiss. Berlin, 1903, N 38.
6. *Rutherford E.*, *Brooks G.* Phil. Mag., July, 1902.
7. *Curie P.* *Danne*. Compt. Rend., 1903, **136**, 364.
8. *Rutherford E.*, *Grier. N.* Phil. Mag., September, 1902.
9. *Rutherford E.* Nature, August 20, 1903, 366.
10. *Rutherford E.*, *Soddy F.* Phil. Mag., May, 1903.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРЕВРАЩЕНИЙ РАДИОАКТИВНЫХ ТЕЛ*

БЕЙКЕРИАНСКАЯ ЛЕКЦИЯ

1. В ряде работ Резерфорда и Содди [1—4] показано, что радиоактивность радиоактивных элементов всегда сопровождается образованием новых веществ, отличающихся по своим физическим и химическим свойствам. Например, торий образует высокоактивное вещество ThX, которое может быть отделено от тория, так как оно растворяется в аммиаке. Кроме того, торий образует газообразный продукт — эманацию тория, а также другое вещество, которое, отлагаясь на поверхности близлежащих тел, вызывает явление, известное под названием «возбужденной активности».

Детальное изучение происхождения этих продуктов показывает, что они образуются не одновременно, а возникают в результате последовательности превращений, происходящих в радиоактивном элементе. Сначала торий образует продукт ThX, который выделяет эманацию тория, в свою очередь превращающуюся в нелетучее вещество. Ряд подобных превращений характерен и для радия, с тем отличием, что при превращении радия не образуется продукта, соответствующего ThX. Сначала радий образует эманацию, которая, как и в случае тория, превращается в нелетучее вещество. При превращении урана наблюдался лишь продукт UX, так как уран не выделяет эманации и, следовательно, не вызывает в телах возбужденной активности.

2. В качестве типичного примера, позволяющего заключить, что одно вещество порождает другое, мы разберем связь двух продуктов — ThX и эманации тория. После выделения ThX из раствора тория путем осаждения с аммиаком выпавший осадок гидрата окиси тория в значительной степени теряет свою способность выделять эманацию. Это не может быть объяснено только тем, что образующаяся эманация не находит выхода, так как при пропускании воздуха через раствор гидроокиси, когда большая часть эманации должна выделяться, наблюдаемое количество эманации очень незначительно. С другой стороны, раствор, содержащий ThX, выделяет большое количество эманации. Это показывает, что именно продукт ThX обладает способностью образовывать эманацию. Обнаружено, что

---

* Philosophical Transactions of the Royal Society, 1904, ser. A, 204, 169—219. Прочитана 19 мая 1904 г.

количество эманации, образуемой отделенным ThX, уменьшается со временем по экспоненциальному закону, падая вдвое за 4 дня. Таким образом, скорость образования эманации уменьшается по тому же закону и с такой же быстротой, что и активность ThX, измеренная обычным способом по α-лучам. Именно этого результата и следовало ожидать, если эманация порождается ThX, так как активность ThX в любой момент времени пропорциональна скорости его превращения, т. е. скорости, с которой происходит образование вторичного вещества. Поскольку скорость превращения эманации (она превращается наполовину за 1 *мин*) намного больше скорости превращения ThX, количество эманации в любой момент практически пропорционально активности ThX, т. е. количеству ThX, оставшегося непревращенным. Тот факт, что гидроокись восстанавливает со временем способность выделять эманацию, объясняется образованием из тория нового ThX, который в свою очередь образует эманацию.

Аналогичным образом в телах, над которыми была пропущена эманация, возникает возбужденная активность, величина которой пропорциональна активности эманации, т. е. количеству присутствующей эманации. Это показывает, что активный осадок, который вызывает явление возбужденной активности, сам есть продукт эманации. Эти данные убедительно свидетельствуют о том, что ThX порождает эманацию, а эманация порождает осажденное вещество.

3. Каждый из этих продуктов имеет ряд характерных химических и физических свойств, которые позволяют отличать их от предшествующих и последующих продуктов. Например, ThX ведет себя как твердое тело и растворяется в аммиаке, тогда как торий этими свойствами не обладает. Эманация тория ведет себя как химически инертный газ и конденсируется при температуре —120° С. Активный осадок от эманации ведет себя как твердое тело, легко растворяется в серной и соляной кислотах и плохо растворяется в аммиаке. Обе эманации и продукты UX и ThX теряют свою активность со временем по экспоненциальному закону со скоростью, которая, насколько показывают наблюдения, не зависит от воздействия имеющихся в нашем распоряжении физических и химических факторов. Таким образом, время, в течение которого активность продукта уменьшается в 2 раза, есть определенная физическая константа, которая отличает его от всех других продуктов.

С другой стороны, убывание «возбужденной активности», возникающей в телах под действием эманаций тория, радия и актиния, не подчиняется простому экспоненциальному закону. Изменение во времени возбужденной активности, особенно для радия, имеет очень сложный характер и зависит от длительности воздействия эманации на тело.

В этой статье будет показано, что сложный характер убывания возбужденной активности тория, радия и актиния обусловлен тем, что осажденное вещество претерпевает два последовательных превращения в случае тория и по меньшей мере четыре последовательных превращения в случае радия.

Эти превращения представляют значительный интерес и будут подробно рассмотрены в настоящей работе. В частности, мы рассмотрим следующие вопросы:

1) Терминология.

2) Скорость убывания возбужденной активности тория и радия, измеренной по разным типам излучения, в зависимости от длительности воздействия эманации.

3) Математическая теория последовательных превращений.

4) Применение этой теории для объяснения превращений тория, актиния, радия.

5) Вещество с малой скоростью распада, получающееся из радия; сравнение этого вещества с радиотеллуром Марквальда.

6) Мнимая радиоактивность обычных веществ, обусловленная отчасти медленно распадающимся радиоактивным осадком, выделяющимся из атмосферы.

7) Сравнение последовательных превращений урана, тория, актиния и радия. Таблица активных продуктов.

8) Роль «безлучевых» превращений радиоактивных элементов.

9) Излучения от радиоактивных продуктов. Роль β- и γ-лучей в последнем быстром превращении радиоактивных элементов.

10) Различие между радиоактивным и химическим превращением.

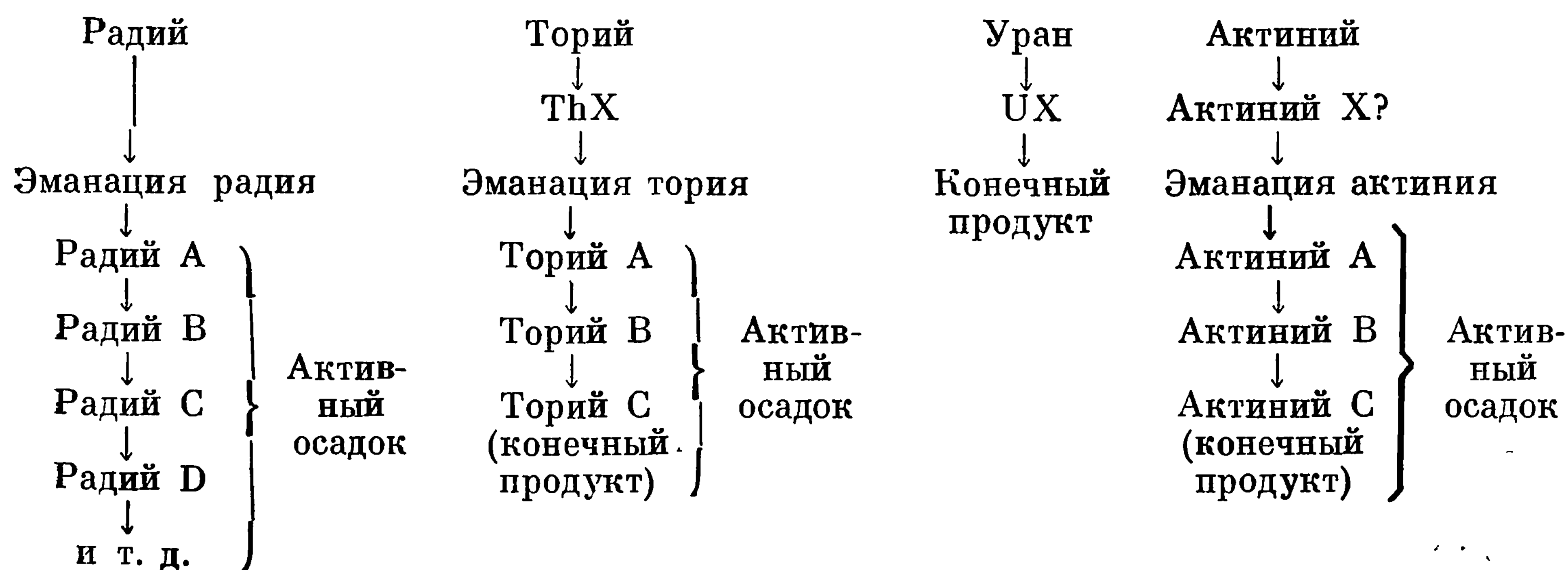
11) Обсуждение экспериментов по определению величины заряда, переносимого α-лучами.

12) Некоторые количественные соотношения, имеющие место при радиоактивном превращении радиоактивных элементов.

13) Происхождение радиоактивных элементов.

4. *Терминология.* Установление терминологии для обозначения многочисленных радиоактивных продуктов — очень важный и трудный вопрос. Поскольку существует по меньшей мере шесть различных веществ, образуемых радием, и, по всей видимости, пять, образуемых актинием и торием, нежелательно и неудобно присваивать каждому из них специальное наименование. Однако настоятельно необходимо иметь для каждого из этих продуктов особое обозначение, которое бы указывало его место в последовательности превращений. Эта трудность особенно заметна при рассмотрении многочисленных превращений активных осадков от различных эманаций. Многие из продуктов сохраняют названия, данные им при их открытии, когда еще не было осознано их место в общей схеме превращений. Так, названия UX и ThX были присвоены радиоактивным остаткам, полученным в результате химической обработки урана и тория. Эти продукты, по всей вероятности,— первые продукты указанных элементов, поэтому представляется целесообразным сохранить эти названия, краткость которых является их несомненным преимуществом. Название «эманация» сначало было присвоено радиоактивному газу, образующемуся из тория, и с тех пор так называли все аналогичные газообразные продукты радия и актиния.

Сочтя название «эманация радия» несколько длинным и неудобным, В. Рамзай [5, 6] предложил заменить его термином «экс-радий». Это название, безусловно, кратко и тоже указывает на происхождение продукта, но имеется еще по меньшей мере четыре «экс-радия», которые, хотя их происхождение, как и происхождение эманации радия, нам хорошо известно, остаются без названия. Возникает дополнительная трудность при употреблении соответствующих названий «экс-торий», «экс-актиний» к другим газообразным продуктам, так как в отличие от радия, эманации тория и актиния, по-видимому, вторые, а не первые продукты распада этих радиоактивных элементов. Таким образом, в этих случаях нужно искать другое наименование для первого продукта. Возможно, имеет смысл дать специальное название для эманации, так как это пока еще наиболее исследованный и первый выделенный химическим путем продукт, но, с другой стороны, термин «эманация радия» представляет уже исторический интерес и указывает на летучесть или газообразность вещества. Поскольку термин «возбужденная», или «наведенная», активность относится только к излучениям радиоактивного тела, необходимо найти название для самого излучающего вещества. В свое время автор данной статьи предложил название «эманация X» [7]. Это название было дано по аналогии с названиями UX и ThX, чтобы подчеркнуть, что это радиоактивное вещество есть продукт эманации. Но это наименование не вполне подходит и, кроме того, им может быть назван лишь первоначальный осажденный продукт, а не дальнейшие продукты его распада. При математическом рассмотрении теории последовательных превращений удобно принять, что осажденное вещество A превращается в B, B в C, C в D и т. д. Поэтому я отказался от термина эманация X и пользовался терминами радий A, радий B и т. д. для обозначения последовательных продуктов распада эманации радия. Аналогичная терминология применяется к торию и актинию. Эта система обозначений гибка, проста и весьма удобна при обсуждении последовательных продуктов. Говоря вообще о радиоактивном веществе, вызывающем возбужденное излучение, безотносительно к его составным частям, я употребил термин «радиоактивный осадок».



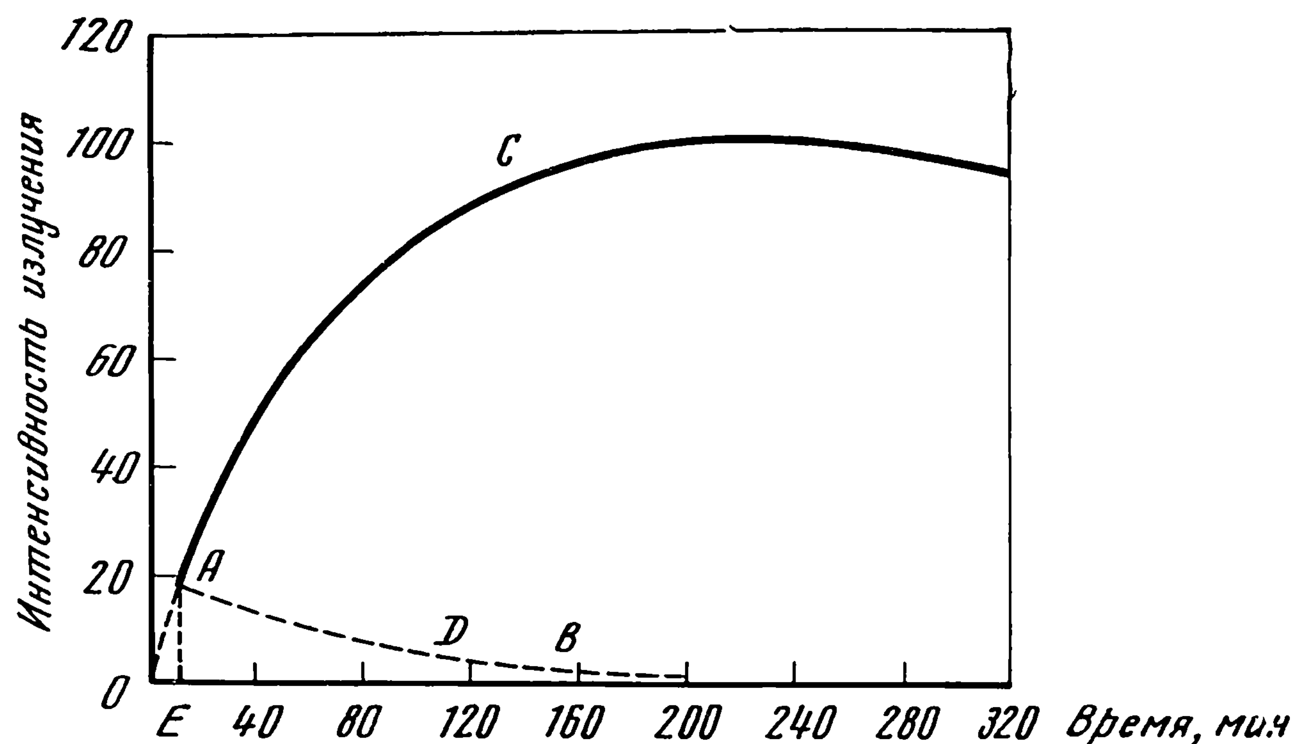


Рис. 1

В приведенной схеме, которая иллюстрирует используемую в данной работе терминологию, каждый продукт порождает продукт, расположенный под ним. Так как по наблюдениям радиоактивные осадки тория и актиния имеют только два продукта, то названия торий С и актиний С относятся соответственно к их конечным неактивным продуктам.

5. *Распад возбужденной активности тория.* Если в течение нескольких дней тело подвергается постоянному воздействию эманации тория, то сообщенная ему активность достигает постоянной величины. После удаления тела его активность начинает уменьшаться со временем приблизительно по экспоненциальному закону, спадая вдвое за 11 *час*. Если же тело подвергается воздействию эманации всего несколько минут, то после удаления его активность возрастает, увеличиваясь за 3 *час* примерно в 5—6 раз по сравнению с первоначальной величиной, и достигает максимума, а затем уменьшается с обычной скоростью, т. е. активность падает вдвое за 11 *час* [8].

На рис. 1 графически изображено возрастание активности стержня, подвергавшегося воздействию эманации в течение 10 *мин* (кривая *C*). Стержень, заряженный отрицательно до потенциала 100 *в*, активировался в замкнутом сосуде [1]. Если увеличивать время экспозиции, то возрастание возбужденной активности становится все менее заметным, а при экспозиции в течение 6 *час* почти не наблюдается. В своей другой работе [14,

[1] Очень важно, чтобы воздух в сосуде был свободен от пыли, так как Брукс обнаружила, что носители «возбужденной активности» в загрязненном воздухе как бы прилипают к частицам пыли и остаются в газе в течение нескольких дней. После приложения электрического поля некоторые частички пыли приближаются к отрицательному электроду. Наличие в стержне радиоактивных примесей в значительной мере маскирует увеличение активности, обусловленное образованием нового радиоактивного вещества.

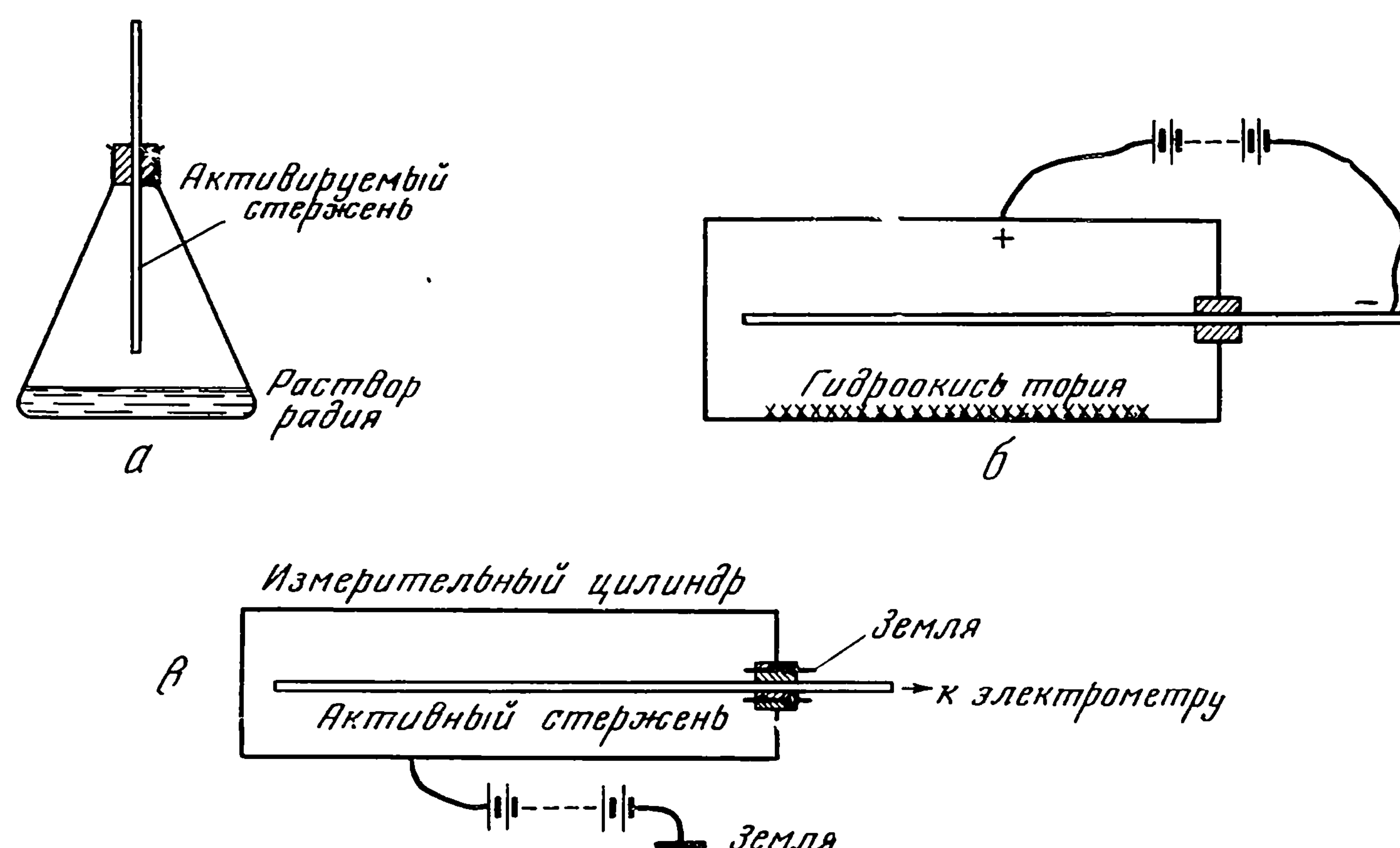


Рис. 2

стр. 258] я подробно обсуждал это любопытное явление и показал, что его можно полностью объяснить, если предположить, что в веществе, осаждающемся из эманации, происходят два последовательных превращения:

1) «Безлучевое» превращение, во время которого вещество превращается по тому же закону, что и при радиоактивном превращении, но которое не сопровождается появлением ни α-, ни β-лучей.

2) Второе превращение, при котором появляются все три вида излучения.

Ниже будет показано (см. раздел 13), что в этих двух превращениях вещество распадается наполовину за 55 *мин* и за 11 *час* соответственно, но, не имея других физических данных, нельзя определить непосредственно из экспериментальных кривых, чему равен период первого превращения — 55 *мин* или 11 *час*. Предположим, что вещество A, осажденное из эманации, превращается в вещество B, которое, в свою очередь, превращается в вещество C. При превращении A в B никакого излучения не наблюдается, тогда как превращение B в C сопровождается всеми тремя видами излучения. Вещество C либо неактивно, либо столь незначительно активно, что его радиоактивность не может быть обнаружена.

Теория этих многочисленных превращений будет рассмотрена ниже одновременно с соответствующими превращениями радия и актиния.

6. *Распад возбужденной активности радия.* Брукс и автор [9] показали, что кривые убывания возбужденной активности радия имеют очень сложный характер и изменяются в зависимости от длительности экспозиции. Позднее было указано, что это, вероятно, объясняется тройным превращением осажденного вещества. П. Кюри и Данн [10] недавно ис-

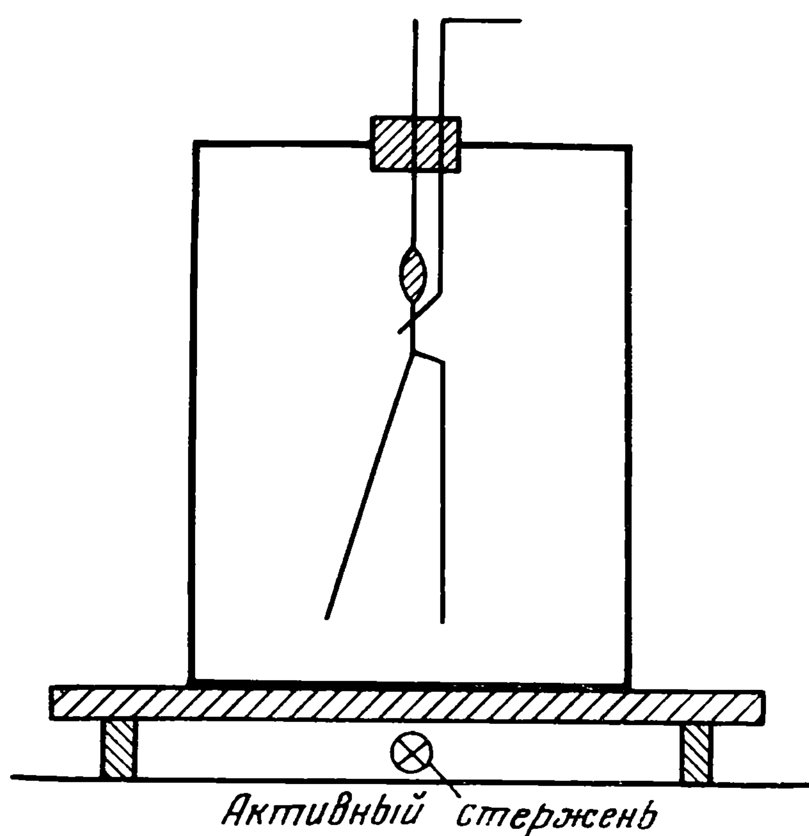


Рис. 3

следовали спад возбужденной активности радия в зависимости от длительности экспозиции. Ниже мы обсудим полученные ими результаты.

Форма кривых спада возбужденной активности радия зависит не только от длительности действия эманации, но и от вида излучения, по которому измеряется активность. Кривые убывания возбужденной активности для α- и β-лучей имеют совершенно различный вид.

В процессе экспериментов раствор радия помещался в закрытом стеклянном сосуде (рис. 2, *а*). Эманация накапливалась в воздухе над раствором. Активируемый стержень вводился в отверстие в пробке и в течение определенного промежутка времени подвергался воздействию эманации. В опытах по изучению возбужденной активности тория внутрь закрытого цилиндра (рис. 2, *б*) помещалось некоторое количество гидроокиси тория, интенсивно выделяющей эманацию. Находящийся в центре активируемый стержень был подсоединен к отрицательному полюсу батареи с напряжением около 100 *в*. При измерениях спада α-активности активированный стержень вводили в цилиндрический сосуд по его оси (рис. 2, *в*), прикладывали напряжение насыщения и с помощью электрометра с подключенным параллельно конденсатором соответствующей емкости измеряли ток между цилиндром и стержнем. Для удаления эманации, которая могла бы прилипнуть к проволоке, через цилиндр постоянно пропускался очищенный от пыли поток воздуха. При проведении опытов с β- и γ-лучами оказалось более целесообразным использовать электроскоп вместо электрометра. Золотые лепестки электроскопа изолировались внутри металлического сосуда с помощью бусинок из серы по методу, примененному впервые Ч.Т.Р. Вильсоном (рис. 3). Перемещение лепестков наблюдалось через слюдяные окошки, а скорость их движения определялась с помощью микроскопа с окулярным микрометром. При измерениях с β-лучами активный стержень помещался под электроскопом; лучи, прежде чем попасть в сосуд, проходили через слой металла достаточной толщины, чтобы поглотить все α-лучи. При измерениях с γ-лучами электроскоп располагался на свинцовой пластине толщиной 0,6 *см*, а активный стержень помещался под этой пластиной. Свинец полностью задерживал α-и β-лучи, и разряд электроскопа вызывался исключительно γ-лучами. Электроскоп весьма удобен для подобного рода измерений и позволяет легко и с высокой степенью точности проводить необходимые наблюдения. Однако его нельзя использовать для регистрации очень быстрых изменений величины активности.

7. Кривая убывания α-активности, возникшей после воздействия эманации радия в течение 1 *мин*, показана на рис. 4 (нижняя кривая).

Эта кривая позволяет выделить три этапа: 1) быстрый (в течение 15 *мин*) спад активности до уровня менее 10% от уровня активности непосредственно после удаления; 2) период в 30 *мин*, в течение которого активность почти не изменяется; 3) постепенное уменьшение активности до нуля.

Сначала активность убывает примерно по экспоненциальному закону, уменьшаясь вдвое за 3 *мин*. Через 3—4 *час* после удаления активность убывает в соответствии с экспоненциальным законом, уменьшаясь в 2 раза приблизительно за 28 *мин*.

Таким образом, эти результаты указывают на существование:

1) начального превращения, в котором половина вещества превращается за 3 *мин*;

2) конечного превращения, в котором половина вещества претерпевает превращение за 28 *мин*.

Прежде чем приступить к объяснению средней части кривой, рассмотрим еще некоторые экспериментальные данные.

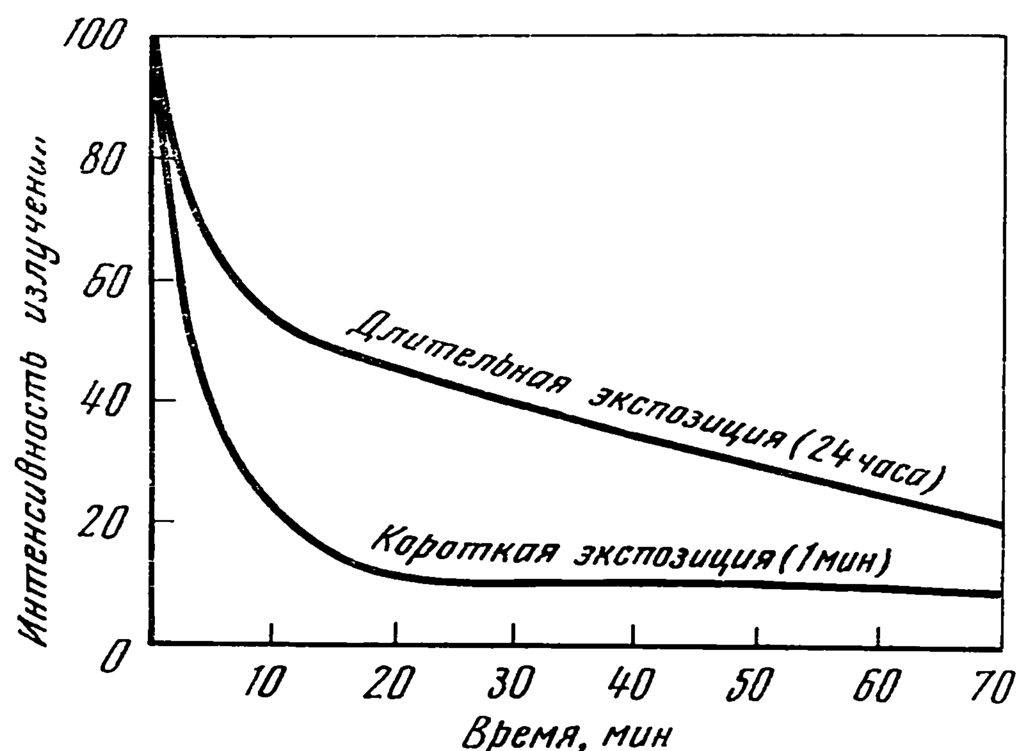


Рис. 4

Кривая спада возбужденной активности при продолжительной экспозиции (24 *час*) изображена графически на рис. 4 (верхняя кривая). В течение первых 15 *мин* наблюдается быстрое убывание активности до 50% ее исходной величины, затем происходит более медленный спад, а по истечении 4 *час* начинается постепенный спад до нуля, который происходит по экспоненциальному закону, причем активность уменьшается в 2 раза за 28 *мин*.

Кривые изменения возбужденной активности со временем, измеренные по β-лучам, представлены на рис. 5 и 6.

Рис. 5 соответствует экспозиции в течение 1 *мин*.

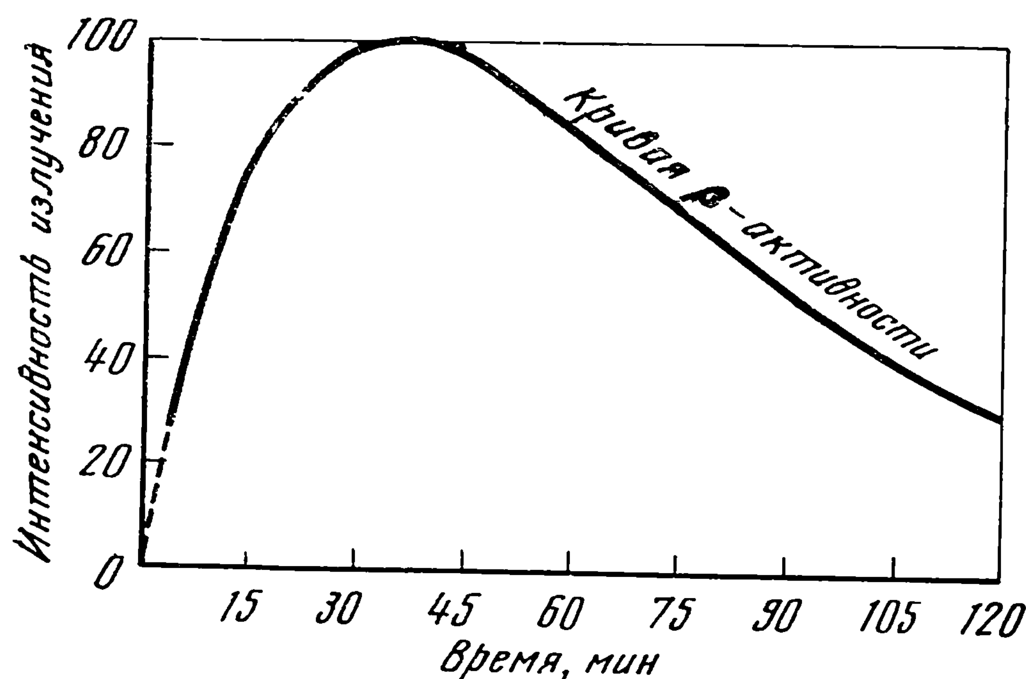


Рис. 5

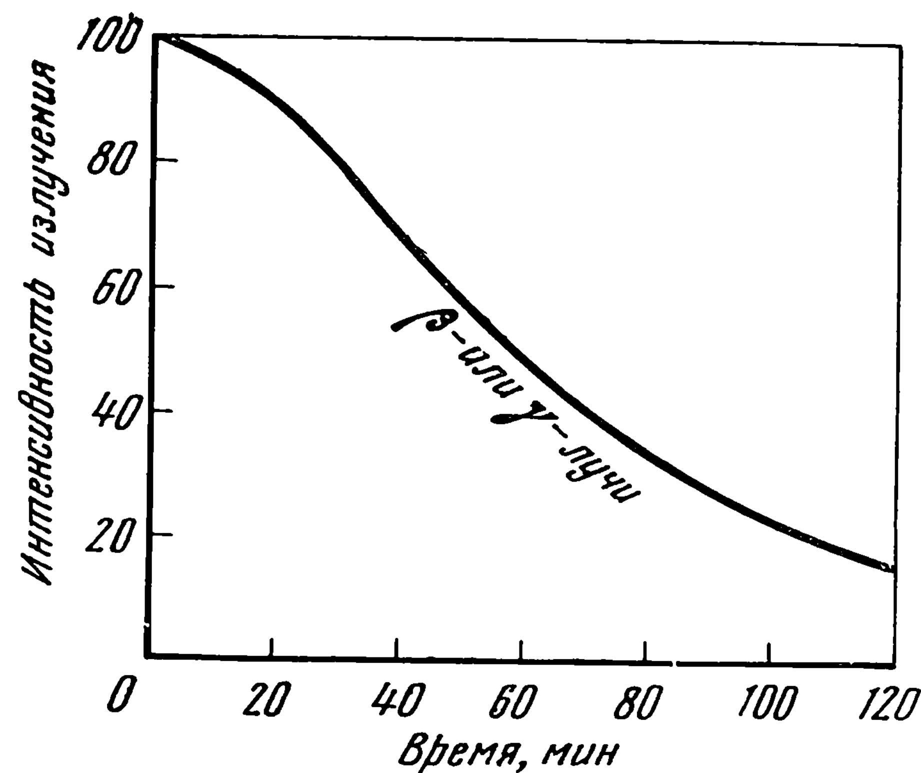


Рис. 6.

Рис. 6 показывает убывание активности в случае длительной экспозиции (около 24 *час*).

Кривые, полученные для β-лучей, резко отличаются от кривых, полученных для α-лучей. При непродолжительной экспозиции активность, измеренная по β-лучам, сначала невелика, затем через 36 *мин* после удаления тела из эманации достигает максимума. Затем происходит постепенный спад, и через несколько часов активность убывает в соответствии с экспоненциальным законом, уменьшаясь вдвое за 28 *мин*.

Кривая для β-лучей, изображенная на рис. 6, по форме очень похожа на соответствующую кривую для α-лучей на рис. 4, если не считать того, что начальный спад, наблюдавшийся для α-лучей, полностью отсутствует. Остальные участки кривых весьма схожи, и если не принимать во внимание первые 15 *мин* после удаления тела из эманации, то убывание активности в обоих случаях происходит с одинаковой скоростью.

Кривые, полученные для γ-лучей, идентичны с кривыми, полученными для β-лучей. Это показывает, что β- и γ-лучи появляются всегда вместе и в одинаковой пропорции.

При увеличении длительности экспозиции с 1 *мин* до 24 *час* получаются промежуточные кривые, лежащие между двумя граничными кривыми (см. рис. 5 и 6).

Результаты, которые получили Кюри и Данн при исследовании убывания возбужденной активности радия в зависимости от различной продолжительности экспозиции, изображены на рис. 7. По оси ординат отложен логарифм активности, а по оси абсцисс — время в часах. При сравнении кривых, полученных мною, с кривыми, которые получили Кюри и Данн, обнаруживаются некоторые заметные различия.

Нижняя кривая, полученная для кратковременной экспозиции в течение 20 *сек*, по форме очень похожа на соответствующую кривую на рис. 4, где активность измерялась по α-лучам.

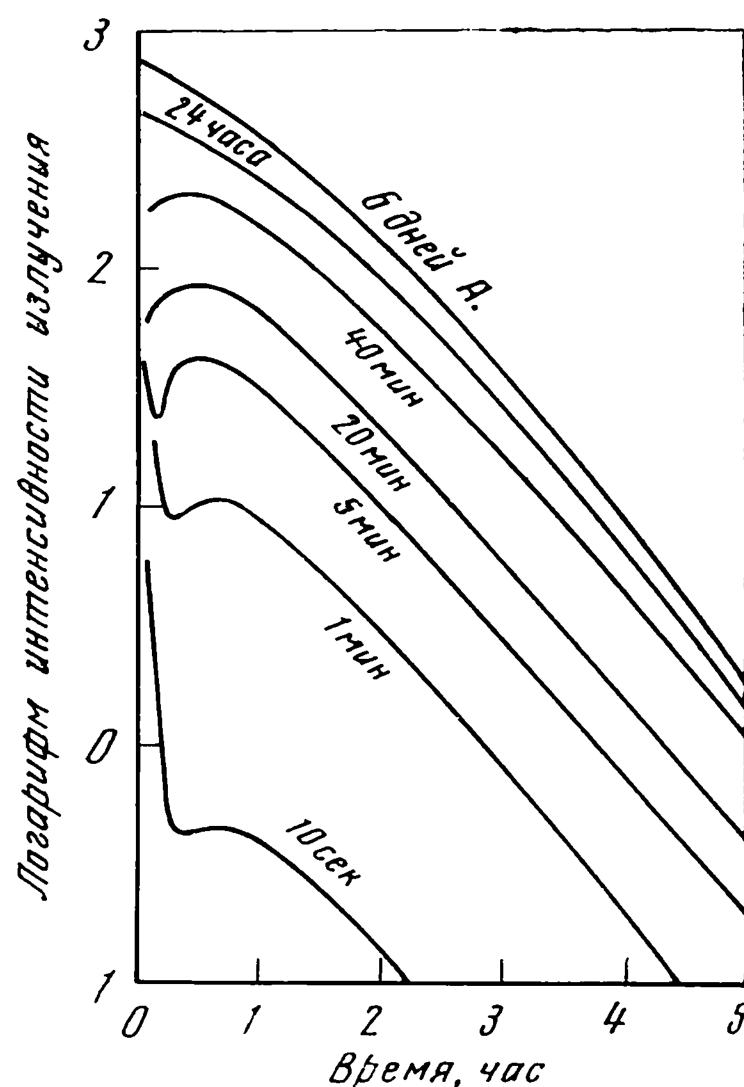


Рис. 7

Однако на верхней кривой рис. 7 отсутствует начальный спад, отмеченный мною (верхняя кривая на рис. 4). Если мы измеряем активность по β-лучам, то верхняя кривая на рис. 7 схожа с кривой, изображенной на рис. 6, однако нижняя кривая на рис. 7 отличается от соответствующей кривой для β-лучей, изображенной на рис. 5.

Я полагаю, что различия между результатами Кюри и Данна и результатами, полученными мною, объясняются тем, что Кюри и Данн не обратили внимания на тот факт, что форма кривых зависит от типа излучения (α- или β-лучи), по которому измеряется активность. Кюри и Данн нигде не пояснют, какой тип лучей они использовали при измерениях, но я думаю, что нижняя кривая (см. рис. 7) была получена ими для α-лучей, тогда как четыре верхние кривые были получены для β-лучей. Промежуточные кривые для облучения продолжительностью 1 и 5 *мин* не согласуются с результатами, полученными мною для α-и β-лучей, но объединяют в себе черты и тех и других.

Быстрый первоначальный спад характерен для кривой, полученной для α-лучей, однако в измерениях, сделанных по β- и γ-лучам, мне удавалось лишь наблюдать подъем до некоторой максимальной величины.

Брукс, работающая в нашей лаборатории, проделала новые измерения спада возбужденной активности радия в зависимости от длительности экспозиции раздельно для α- и β-лучей. Эти результаты будут вскоре опубликованы [11].

8. *Объяснение кривых.* Выше было указано, что быстрый начальный спад, наблюдаемый на кривых на рис. 4, объясняется превращением, сопровождающимся α-лучами, при котором половина вещества превращается за 3 *мин*. Отсутствие спада на соответствующих кривых при измерении активности по β-лучам показывает, что при первом 3-минутном превращении β-лучи не испускаются, так как если бы при этом возникали β-лучи, то активность уменьшалась бы с такой же скоростью, как и в случае с α-лучами.

Известно, что по истечении нескольких часов после прекращения действия эманации активность во всех случаях убывает со временем по экс-

поненциальному закону, уменьшаясь наполовину за 28 *мин*. Этот факт не зависит ни от длительности воздействия эманации, ни от типа лучей, по которым измеряется активность. Это показывает, что конечное 28-минутное превращение порождает все три вида лучей.

Ниже будет показано, что все эти результаты могут быть объяснены на основе предположения, что в осажденном веществе происходят три последовательных превращения [1]:

1) Первое превращение осажденного вещества, при котором половина вещества превращается примерно за 3 *мин* и при котором возникают только α-лучи.

2) Второе «безлучевое» превращение, в котором половина вещества превращается за 21 *мин*.

3) Третье превращение, при котором половина вещества превращается за 28 *мин* и которое порождает α-, β- и γ-лучи.

9. *Теория последовательных превращений*. Прежде чем обсуждать данные, на которых основывается вывод о существовании этих превращений, рассмотрим общую теорию последовательных превращений радиоактивных веществ. Предполагается, что вещество A, осажденное из эманации, превращается в вещество B, B в C, C в D и т. д.

Предполагается, что каждое из этих превращений подчиняется тому же закону, что и мономолекулярная химическая реакция, т. е. число N частиц, оставшихся непревращенными по истечении времени t, определяется формулой $N = N_0 e^{-\lambda t}$, где N_0 — начальное число частиц, а λ — константа данного превращения.

Поскольку $dN/dt = -\lambda N$, то скорость превращения всегда пропорциональна количеству вещества, оставшегося непревращенным. Ранее было указано, что этот закон спада активности радиоактивных продуктов выражает тот факт, что это радиоактивное превращение принадлежит к тому же типу, что и мономолекулярная химическая реакция.

---

[1] Предположение, что сложный характер убывания возбужденной активности, создаваемой радием и торием, объясняется двойным превращением осадка тория и тройным превращением осадка радия, было впервые высказано в 1902 г. [12] и позднее обсуждалось в работах [8, 5, 4]. В 1903 г. Кюри и Данн [10] обнаружили, что кривая спада возбужденной активности радия (измеренной по β-лучам) может быть описана эмпирической формулой, представляющей собой разность двух экспонент. Четкое утверждение о превращениях активного осадка радия и о существовании безлучевого превращения появилось впервые в работе [13]. Обсуждение данных, на которых основывались эти заключения, было решено дать в последующей статье. Обзор теории последовательных превращений и доказательства существования безлучевого превращения радия и тория были даны в книге автора [14, стр. 268—274]. Несколько позднее Кюри и Данн [15], используя гипотезу о последовательных превращениях, выдвинутую Резерфордом и Содди, пришли к аналогичному заключению относительно превращений радия. В последующей работе [16] Кюри и Данн описали некоторые важные эксперименты по изучению влияния температуры на кривые спада активности и показали, что продукт радий B может быть отделен от радия C путем возгонки при соответствующей температуре.

Пусть P, Q, R означают количество частиц продуктов A, B и C соответственно в любой момент времени t и пусть λ_1, λ_2, λ_3 — константы соответствующих превращений веществ A, B и C.

Будем предполагать, что каждый атом вещества A порождает один атом вещества B, один атом вещества B — один атом C и т. д.

Испускаемые «лучи», или частицы, нерадиоактивны и в данной теории не рассматриваются.

Сначала рассмотрим общую теорию применительно к практическим случаям кратковременного и очень длительного воздействия эманации на тело и уж затем применительно к произвольной длительности воздействия при постоянном уровне присутствующей эманации.

10. *Кратковременная экспозиция*. Предположим, что в течение короткого промежутка времени какое-то тело подвергалось воздействию эманации радия или тория, а затем было удалено. Будем считать, что этот промежуток времени настолько короток, что за это время претерпевает превращение ничтожно малая доля осажденного вещества. Требуется найти число частиц P, Q, R продуктов A, B, C по истечении времени t.

Очевидно, что $P = ne^{-\lambda_1 t}$, где n — количество частиц, образовавшихся за время облучения. Число dQ, на которое увеличивается количество частиц вещества B за единицу времени, равно числу частиц, появляющихся при превращении вещества A, минус число частиц, образующихся при превращении B в C:

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda_1 P - \lambda_2 Q. \qquad (1)$$

Аналогично,

$$\frac{dR}{dt} = \lambda_2 Q - \lambda_3 R. \qquad (2)$$

Подставляя в (1) значение P, получаем

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda_1 ne^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 Q.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$Q = n\left(ae^{-\lambda_1 t} + be^{-\lambda_2 t}\right), \qquad (3)$$

где $a = \lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)$. Так как $Q = 0$ при $t = 0$, то $b = -\lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)$. Таким образом,

$$Q = \frac{n\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2}\left(e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}\right). \qquad (4)$$

Подставляя это значение Q в (2), можно легко показать, что

$$R = n\left(ae^{-\lambda_1 t} + be^{-\lambda_2 t} + ce^{-\lambda_3 t}\right), \qquad (5)$$

где

$$a = \frac{\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)}; \qquad b = \frac{-\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_3)}; \qquad c = \frac{\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}.$$

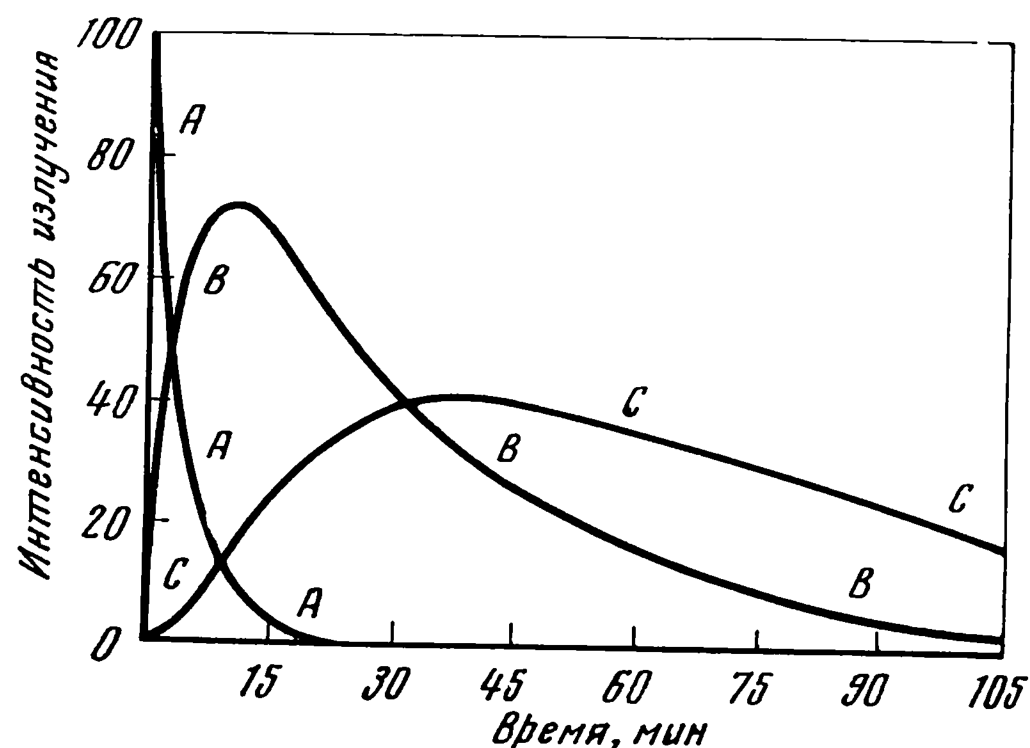


Рис. 8

Изменение величин P, Q, R в зависимости от времени t, прошедшего после удаления тела из эманации, представлено графически на рис. 8 кривыми A, B и C. При вычерчивании кривых для случая первых трех превращений радия А значения констант λ_1, λ_2, λ_3 были приняты равными $3{,}85 \cdot 10^{-3}$, $5{,}38 \cdot 10^{-4}$ и $4{,}13 \cdot 10^{-4}$ соответственно, т. е. время, необходимое для того, чтобы половина каждого вещества подверглась превращению, равно соответственно 3, 21 и 28 *мин.*

По оси ординат отложено относительное количество атомов веществ A, B и C, соответствующее моменту времени t, при этом начальное количество атомов осажденного вещества A принято равным $n = 100$. Вначале количество вещества B равно нулю, через 10 *мин* оно достигает максимальной величины и затем начинает уменьшаться с течением времени. Аналогичным образом количество вещества C достигает максимума через 37 *мин* после удаления тела из эманации. По истечении нескольких часов количество веществ B и C начинает уменьшаться со временем примерно по экспоненциальному закону, уменьшаясь наполовину за 21 и 28 *мин* соответственно.

11. *Длительная экспозиция.* Предположим, что длительность экспозиции настолько велика, что достигается состояние равновесия между эманацией и последовательно образующимися из нее продуктами. В этом случае количество n_0 частиц вещества A, образующихся из эманации за 1 *сек*, равно количеству частиц A, превращающихся за 1 *сек* в B, равно количеству частиц вещества B, превращающихся ежесекундно в C, и т. д. Это означает, что выполняется соотношение

$$n_0 = \lambda_1 P_0 = \lambda_2 Q_0 = \lambda_3 R_0, \tag{6}$$

где P_0, Q_0, R_0 — максимальные количества частиц веществ A, B и C по достижении состояния равновесия. После удаления из эманации значе-

ния величин P, Q и R в любой момент времени могут быть выражены уравнениями того же вида (3) и (5), что и для кратковременной экспозиции. Так как вначале

$$P = P_0 = \frac{n_0}{\lambda_1},$$

$$Q = Q_0 = \frac{n_0}{\lambda_2},$$

$$R = R_0 = \frac{n_0}{\lambda_3},$$

то можно легко показать, что

$$P = \frac{n_0}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 t}, \tag{7}$$

$$Q = \frac{n_0}{\lambda_1 - \lambda_2}\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}\right), \tag{8}$$

$$R = n_0 \left(a e^{-\lambda_1 t} + b e^{-\lambda_2 t} + c e^{-\lambda_3 t}\right), \tag{9}$$

где

$$a = \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)}; \qquad b = \frac{-\lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_3)}; \qquad c = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3 (\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}.$$

Относительное количество атомов P, Q, R в произвольный момент времени представлено на рис. 9 (кривые A, B и C соответственно). Для сравнения число атомов R_0 принимается за 100, а величины λ_1, λ_2, λ_3 соответствуют 3-, 21- и 28-минутному превращениям активного осадка радия. Сравнение с графиком на рис. 8, соответствующим случаю кратковременной экспозиции, ясно показывает различие в изменении относительных величин P, Q и R. Величина R уменьшается сначала очень медленно. Это объясняется тем, что увеличение количества вещества C, которое происходит за счет распада B, почти полностью компенсируется распадом самого вещества C. По истечении нескольких часов величины Q и R уменьшаются в соответствии с экспоненциальным законом, уменьшаясь вдвое за каждые 28 *мин.*

12. *Произвольная длительность экспозиции.* Предположим, что тело подвергается действию постоянного количества эманации и что за каждую секунду осаждается n_0 частиц вещества A. Через время T количество частиц P_T вещества A будет определяться формулой

$$P_T = n_0 \int_0^T e^{-\lambda_1 t} dt = \frac{n_0}{\lambda_1}\left(1 - e^{-\lambda_1 T}\right).$$

В любой момент времени t после удаления из эманации количество частиц P вещества A описывается формулой

$$P = P_T e^{-\lambda_1 t} = \frac{n_0}{\lambda_1}\left(1 - e^{-\lambda_1 T}\right) e^{-\lambda_1 t}.$$

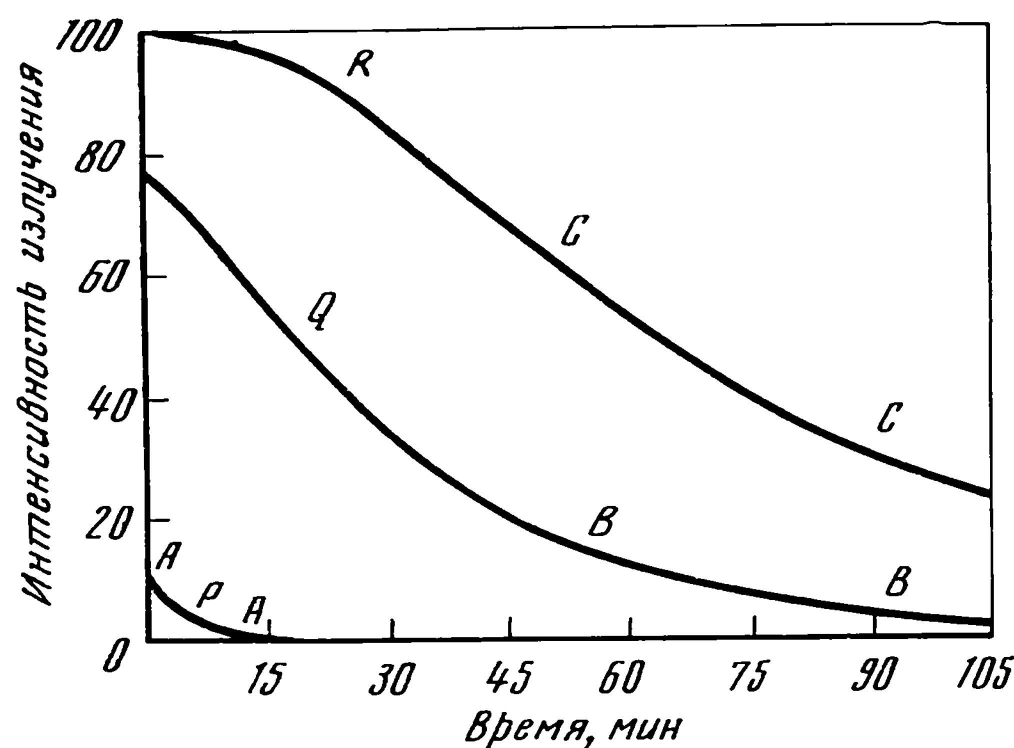


Рис. 9

Рассмотрим количество частиц $n_0 dt$ вещества A, осажденного за промежуток времени dt. Количество частиц dQ вещества B, образовавшегося в результате превращения A, спустя время t выражается формулой [см. уравнение (4)]:

$$dQ = \frac{n_0 \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})\, dt = n_0 f(t)\, dt. \tag{10}$$

Легко видеть, что к моменту T удаления из эманации количество частиц Q_T вещества B будет равно

$$Q_T = n_0 [f(T)\, dt + f(T - dt)\, dt + \ldots + f(0)\, dt] = n_0 \int_0^T f(t)\, dt.$$

Если по истечении времени T действие эманации на тело прекращено, то в любой момент времени t после этого количество частиц вещества B определяется аналогичным образом:

$$Q = n_0 \int_t^{T+t} f(t)\, dt.$$

Следует отметить, что формулы для Q и Q_T не зависят от конкретного вида функции $f(t)$.

Подставляя сюда функцию $f(t)$ из уравнения (10) и интегрируя, получим

$$\frac{Q}{Q_T} = \frac{a e^{-\lambda_2 t} - b e^{-\lambda_1 t}}{a - b}, \tag{11}$$

где

$$a = \frac{1 - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_2}; \qquad b = \frac{1 - e^{-\lambda_1 T}}{\lambda_1}.$$

Аналогичным образом может быть найдено количество частиц R вещества C для любого момента времени, если в качестве функции $f(t)$ подставить функцию, полученную из уравнения (5). Однако получающиеся при этом уравнения слишком громоздки для практических применений, и поэтому мы их здесь не приводим.

13. *Превращения активного осадка тория.* Если изменение активности, образовавшейся в теле в результате кратковременного действия эманации тория, вызывается двумя последовательными превращениями осажденного вещества A, причем первое превращение «безлучевое», то активность I_t в любой момент времени t после прекращения воздействия эманации должна быть пропорциональна числу Q_t частиц вещества B, имеющихся в данный момент. Далее, из уравнения (4) следует

$$Q_t = \frac{\lambda_1 n}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}\right).$$

Величина Q_t достигает максимального значения Q_T в момент времени T, причем

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = e^{-(\lambda_1 - \lambda_2) T}.$$

Максимальная активность I_T пропорциональна Q_T и

$$\frac{I_t}{I_T} = \frac{Q_t}{Q_T} = \frac{e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}}{e^{-\lambda_2 T} - e^{-\lambda_1 T}}. \qquad (12)$$

Ниже будет показано, что изменение активности, образовавшейся в теле в результате кратковременной экспозиции, описывается уравнением указанного вида. Таким образом, остается определить численные значения величин λ_1 и λ_2. Так как приведенное выше уравнение симметрично относительно λ_1 и λ_2, то из экспериментальных кривых невозможно установить, которое из значений λ_1 и λ_2 относится к первому превращению. Если λ_1 и λ_2 поменять местами, то кривая изменения активности в зависимости от времени останется той же самой.

Экспериментальным путем было обнаружено, что через 5—6 *час* после удаления из эманации активность падает примерно по экспоненциальному закону, уменьшаясь вдвое за 11 *час*. Такое значение скорости нормально для тория, оно наблюдается при любой длительности экспозиции, но при условии, что измерения проводятся лишь по истечении нескольких часов после удаления тела из эманации.

Это позволяет определить значение константы одного из превращений. Предположим, что таким способом мы получили значение λ_1.

Тогда

$$\lambda_1 = 1{,}75 \cdot 10^{-5} \textit{сек}^{-1}.$$

Поскольку активность достигает максимума через время $T = 220$ *мин* (кривая C на рис. 1), то, подставляя значение λ_1 и T в уравнение (12),

получаем

$$\lambda_2 = 2{,}08 \cdot 10^{-4}\ сек^{-1}.$$

Эта величина λ_2 соответствует превращению с периодом 55 *мин*.

Подставляя значения λ_1, λ_2 и T в уравнение (12), приводим его к виду

$$\frac{I_t}{I_T} = 1{,}37\left(e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}\right).$$

Сравнение экспериментальных данных и результатов, рассчитанных по формуле, приведено в табл. 1.

Таким образом, возрастание активности после кратковременного облучения получает вполне удовлетворительное объяснение, если предположить, что в осажденном веществе происходят два превращения, первое из которых является «безлучевым».

Таблица 1

Время, *мин*	Теоретическое значение I_t/I_T	Экспериментальное значение I_t/I_T	Время, *мин*	Теоретическое значение I_t/I_T	Экспериментальное значение, I_t/I_T
15	0,22	0,23	120	0,90	0,91
30	0,38	0,37	220	1,00	1,00
60	0,64	0,63	305	0,97	0,96

Требуются дополнительные данные, чтобы определить, какая из констант относится к первому превращению. Чтобы установить это, необходимо выделить один из продуктов превращений и исследовать изменение его активности в зависимости от времени. Если, например, окажется возможным выделить продукт, активность которого уменьшается наполовину за 55 *мин*, то это будет означать, что второе превращение протекает быстрее, чем первое. Пегрэм [17] исследовал радиоактивные продукты, полученные в результате электролиза растворов тория. Скорость распада радиоактивных продуктов зависит от условий, но он обнаружил, что в некоторых случаях получаются быстро распадающиеся продукты, активность которых падала наполовину приблизительно в течение 1 *час*. Этот результат (хотя мы и учитываем возможность того, что изучавшийся продукт мог быть не полностью отделен посредством электролиза от других продуктов и содержать их примеси) также свидетельствует о том, что последнее превращение, которое сопровождается появлением лучей, происходит быстрее первого.

Результаты, полученные фон Лерхо́м [18] при электролизе раствора радиоактивного осадка, также допускают подобное толкование. На электродах были получены продукты с разной скоростью распада, их актив-

ность уменьшалась наполовину за различные промежутки времени — от 1 до 5 *час*. Возможно, эти различия вызывались смешением двух продуктов, однако для полного выяснения этого вопроса необходимы дальнейшие эксперименты. Таким образом, данные в целом подтверждают вывод, что активный осадок тория претерпевает два последовательных превращения:

1) «Безлучевое» превращение, для которого $\lambda = 1{,}75 \cdot 10^{-5}$, т. е. половина вещества превращается за 11 *час*.

2) Второе превращение, порождающее α-, β- и γ-лучи, для которого $\lambda = 2{,}08 \cdot 10^{-5}$, т. е. половина вещества распадается за 55 *мин* [1].

На первый взгляд кажется несколько неожиданным, что скорость, с которой в конце концов распадается активный осадок тория, дает нам скорость превращения не последнего, а предыдущего продукта, который вообще не испускает лучей.

Аналогичная особенность наблюдается и в случае распада возбужденной активности актиния, рассматриваемого в разделе 15.

14. В случае длительного воздействия постоянного количества эманации тория уравнение, описывающее изменение активности в зависимости от времени, получается из уравнения (8) раздела 11:

$$\frac{I_t}{I_T} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} = \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - 0{,}083 e^{-1{,}90 \cdot 10^{-4} t}).$$

Примерно через 4 *час* после удаления из эманации второй член в скобках становится очень малым, и с этого времени активность начинает уменьшаться примерно по экспоненциальному закону, уменьшаясь вдвое за 11 *час*. Для произвольной длительности экспозиции T активность в любой момент времени t после удаления из эманации [см. уравнение (11)] описывается формулой

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{Q_t}{Q_T} = \frac{a e^{-\lambda_2 t} - b e^{-\lambda_1 t}}{a - b},$$

где I_0 — начальная величина активности сразу же после удаления из эманации;

$$a = \frac{1 - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_2}; \qquad b = \frac{1 - e^{-\lambda_1 T}}{\lambda_1}.$$

Подставляя значения λ_1 и λ_2 и изменяя T, из данного уравнения можно с высокой степенью точности получить кривые изменения активности для любой длительности экспозиции. Брукс [19] исследовала кривые спада возбужденной активности тория для различной длительности экспозиции и обнаружила хорошее совпадение между экспериментом и теорией.

---

[1] «Безлучевое» превращение определенно не сопровождается испусканием α-лучей. Специальные эксперименты не обнаружили присутствия сколько-нибудь заметного количества β-лучей. С другой стороны, второе превращение порождает все три типа лучей.

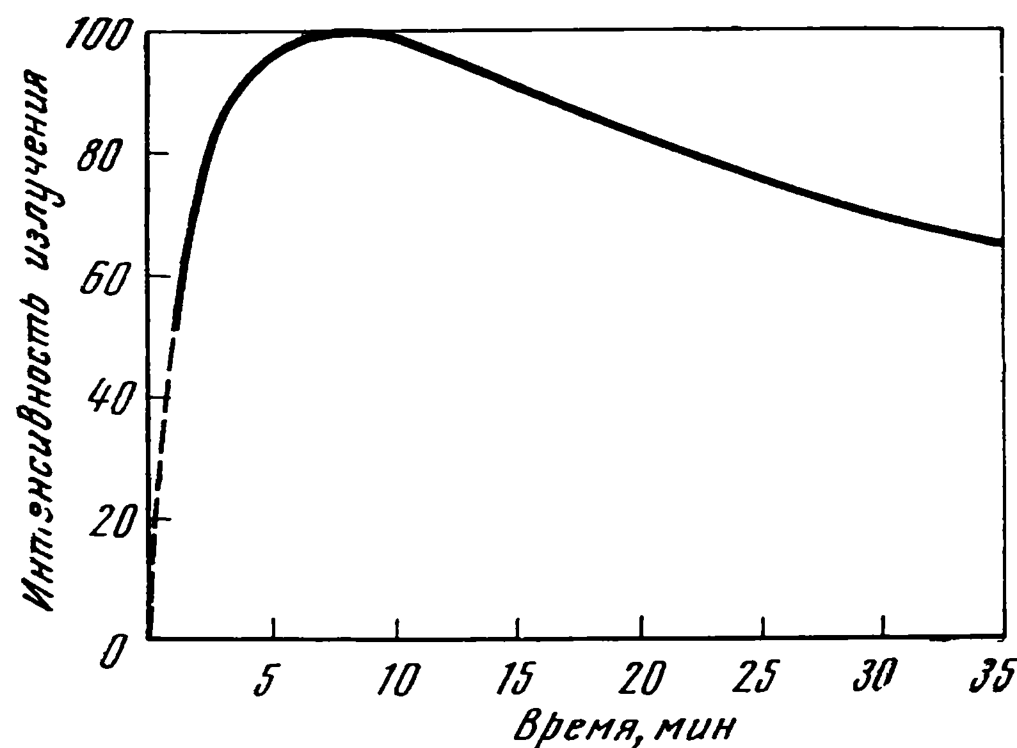


Рис. 10

15. *Превращения актиния.* Гизель любезно переслал мне радиоактивный препарат, которому он дал название «эманирующее вещество», так как оно выделяет большое количество эманации. Активность этого вещества, измеренная обычным способом, в 250 раз превышает активность урана. Брукс согласилась исследовать для меня эманацию и создаваемую ею возбужденную активность. Выяснилось, что эманация имеет очень высокую скорость распада, ее активность уменьшается вдвое за несколько секунд. Возбужденная активность после длительной экспозиции уменьшается наполовину за 41 *мин.* Дебьерн [20] показал, что актиний выделяет эманацию, активность которой убывает вдвое за 3,7 *сек* и которая создает возбужденную активность, уменьшающуюся вдвое за 41 *мин.* Нет никаких сомнений в том, что «эманирующее вещество» Гизеля и актиний Дебьерна содержат в своем составе одно и то же радиоактивное вещество. Поэтому «эманирующее вещество» Гизеля мы будем в дальнейшем называть актинием. Брукс исследовала скорость распада возбужденной активности актиния при различных длительностях экспозиции, однако для выяснения происходящих превращений нам понадобится рассмотреть кривые убывания возбужденной активности лишь для случаев кратковременной и очень длительной экспозиций. После длительной экспозиции активность падает примерно по экспоненциальному закону, уменьшаясь вдвое за 41 *мин.* Значение постоянной превращения λ равно $2{,}80 \cdot 10^{-4}$ *сек*$^{-1}$.

При кратковременной экспозиции активность сначала возрастает, быстро достигает максимума, а затем спадает в соответствии с экспоненциальным законом, уменьшаясь вдвое за 41 *мин.* На рис. 10 приведена кривая изменения активности в результате полутораминутного воздействия эманации актиния.

Активность достигает максимума через 7,5 *мин* после начала воздействия.

По общему виду эта кривая очень похожа на соответствующую кри-

вую для тория и может быть исследована таким же образом. В любой момент времени t активность пропорциональна $e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}$.

Эти результаты показывают, что первое превращение радиоактивного осадка актиния представляет собой безлучевое превращение. Поскольку в конце концов активность падает в соответствии с экспоненциальным законом (уменьшаясь наполовину за 41 *мин*), одна из констант превращения имеет величину $2{,}80 \cdot 10^{-4}$, после чего из кривой получаем, что величина другой константы равна $7{,}7 \cdot 10^{-3}$ (вещество превращается наполовину за 1,5 *мин*).

Как и в случае с торием, появляется затруднение: какое из этих значений λ соответствует безлучевому превращению, однако этот вопрос в случае актиния может быть сразу же разрешен при помощи электролиза.

Брукс выполнила следующий эксперимент. Платиновая пластинка была активирована в присутствии актиния, затем активное вещество было растворено в соляной кислоте и подверглось электролизу. Активность анода после удаления из электролита падала очень быстро в соответствии с экспоненциальным законом, уменьшаясь до половины первоначальной величины за 1,5 *мин*. Соответствующая этому величина λ составляет $7{,}7 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, несомненно, что радиоактивный осадок актиния претерпевает два различных последовательных превращения:

1) Безлучевое превращение, в котором половина вещества превращается за 41 *мин*.

2) Превращение, сопровождающееся α-лучами, в котором половина вещества распадается за 1,5 *мин* [1].

Можно легко показать, что при кратковременной экспозиции тела в присутствии эманации актиния активность I_t в произвольный момент времени t описывается формулой

$$\frac{I_t}{I_T} = 1{,}14\,(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}),$$

где I_T — максимальное значение активности, получающееся при $T = 7{,}5$ *мин*.

При длительной экспозиции

$$\frac{I_t}{I_0} = 1{,}038 e^{-\lambda_1 t} - 0{,}038 e^{-\lambda_2 t},$$

где I_0 — начальная активность сразу же после удаления из эманации, а

$$\lambda_1 = 2{,}80 \cdot 10^{-4}, \qquad \lambda_2 = 7{,}7 \cdot 10^{-3}.$$

Следовательно, в течение первых 10 *мин* активность уменьшается медленнее, чем это следует из простого экспоненциального закона. Этот результат подтверждается экспериментом. Изменение активности при произвольной длительности экспозиции описывается уравнением того же вида,

[1] Излучения от этих продуктов еще не исследованы на наличие в них β- и γ-лучей.

что и для тория [см. уравнение (12)], причем λ_1 и λ_2 имеют значения, приведенные выше.

Есть некоторые указания на то, что в актинии присутствует продукт актиний X, который соответствует торию X в случае тория. В настоящее время этот вопрос изучается, и результаты будут опубликованы позднее. Если это действительно так, то радиоактивные свойства актиния и тория имеют очень много общего. Оба элемента выделяют эманацию, которая превращается в активный осадок, претерпевающий в дальнейшем еще два превращения, первое из которых «безлучевое».

16. *Превращения активного осадка радия.* Рассматривая радиоактивный осадок радия, мы имеем дело с веществом, которое претерпевает по меньшей мере четыре последовательных превращения. Для удобства назовем вещество, образующееся из эманации, веществом A, а последующие продукты — соответственно B, C, D и E. Формулы, выражающие количества веществ A, B, C, D в произвольный момент времени, очень сложны, однако сравнение экспериментальных и теоретических данных может быть облегчено, если на время пренебречь несущественными членами. Например, активность вещества D обычно крайне незначительна по сравнению с активностью веществ A или C и, как правило, составляет $^1/_{10\,000}$ начальной активности веществ A или C. Следующее упрощение может быть получено, если учесть, что первое превращение происходит очень быстро (за 3 *мин*). В течение 6 *мин* после удаления из эманации $^3/_4$ вещества A превратится в вещество B, а через 20 *мин* после удаления останется непревращенным только 1% вещества A. Изменение во времени количеств веществ B или C лучше согласуется с теорией, если мы вообще не учитываем первое превращение. Этот важный вопрос будет обсуждаться в разделе 21.

17. *Кривые β-активности.* Сначала рассмотрим кривые β-активности для разной длительности экспозиции (см. рис. 5 и 6). При кратковременной экспозиции активность, измеренная по β-лучам, сначала очень невелика, спустя 3 *мин* она достигает максимума, а затем начинает постепенно уменьшаться со временем.

Кривая, приведенная на рис. 6, по своему общему виду очень похожа на соответствующие кривые для тория и актиния. Это позволяет предположить, что превращение вещества B в вещество C не сопровождается испусканием β-лучей и что β-лучи появляются во время превращения вещества C в D. В таком случае активность, измеренная по β-лучам, должна быть пропорциональна количеству вещества C. Если мы не принимаем во внимание первое превращение, то активность I_t в любой момент времени описывается уравнением того же вида [см. уравнение (12), раздел 13], что и в случае тория и актиния:

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_2 t}}{e^{-\lambda_3 T} - e^{-\lambda_2 T}},$$

где I_T — максимальная активность, которая достигается через проме-

жуток времени T. Так как в конечном итоге активность уменьшается по экспоненциальному закону (вдвое за 28 *мин*), то для одного из значений λ получаем величину $4{,}13\cdot10^{-4}$. Как и в случае тория и актиния, экспериментальные кривые не позволяют установить, какой из констант λ_2 или λ_3 соответствует это значение. Из других данных (см. раздел 20) будет ясно, что это значение относится к λ_3. Таким образом, $\lambda_3 = 4{,}13\cdot10^{-4}$ *сек*$^{-1}$.

Экспериментальная кривая очень хорошо согласуется с теорией, если положить $\lambda_2 = 3{,}10\cdot10^{-4}$ *сек*$^{-1}$.

Совпадение экспериментальных и теоретических данных иллюстрируется табл. 2. Максимальная величина I_T (принятая за 100) достигается за время $T = 36$ *мин*.

Таблица 2

Время, *мин*	Теоретическое значение	Экспериментальное значенне	Время, *мин*	Теоретическое значение	Экспериментальное значение
0	0	0	50	93,4	92
10	58,1	55	60	83,4	82
20	88,6	86	80	63,7	61,5
30	97,3	97	100	44,8	42,5
36	100	100	120	30,8	29
40	99,8	99,5			

При измерении β-активности мы поступали следующим образом. Тонкий алюминиевый листок был помещен внутрь стеклянной трубки, из которой затем откачивался воздух. После этого через запорный кран, сообщавшийся с сосудом, содержавшим эманацию при атмосферном давлении, в трубку было введено большое количество эманации радия. Эманация оставалась в трубке 1,5 *мин*, а затем быстро удалялась потоком воздуха. После этого алюминий был удален из трубки и помещен под такой же электроскоп, какой изображен на рис. 3. Испускаемые алюминием α-лучи поглощались алюминиевым экраном толщиной 0,1 *мм*. Отсчет времени начинался через 45 *сек* после введения эманации.

Как мы видели, наблюдается довольно хорошее совпадение между экспериментальными и расчетными значениями β-активности. Эти результаты получают вполне удовлетворительное объяснение, если предположить, что 1) при превращении вещества B в C (период полураспада 21 *мин*) β-лучи не возникают; 2) превращение вещества C в D (период полураспада 28 *мин*) сопровождается испусканием β-лучей.

Эти выводы подтверждаются экспериментально при изучении убывания β-активности после длительной экспозиции. Кривая распада представлена на рис. 6 и 11 (кривая *1*).

Кюри и Данн сделали важное наблюдение, обнаружив, что приведенная на рис. 7 кривая распада C для случая длительной экспозиции может

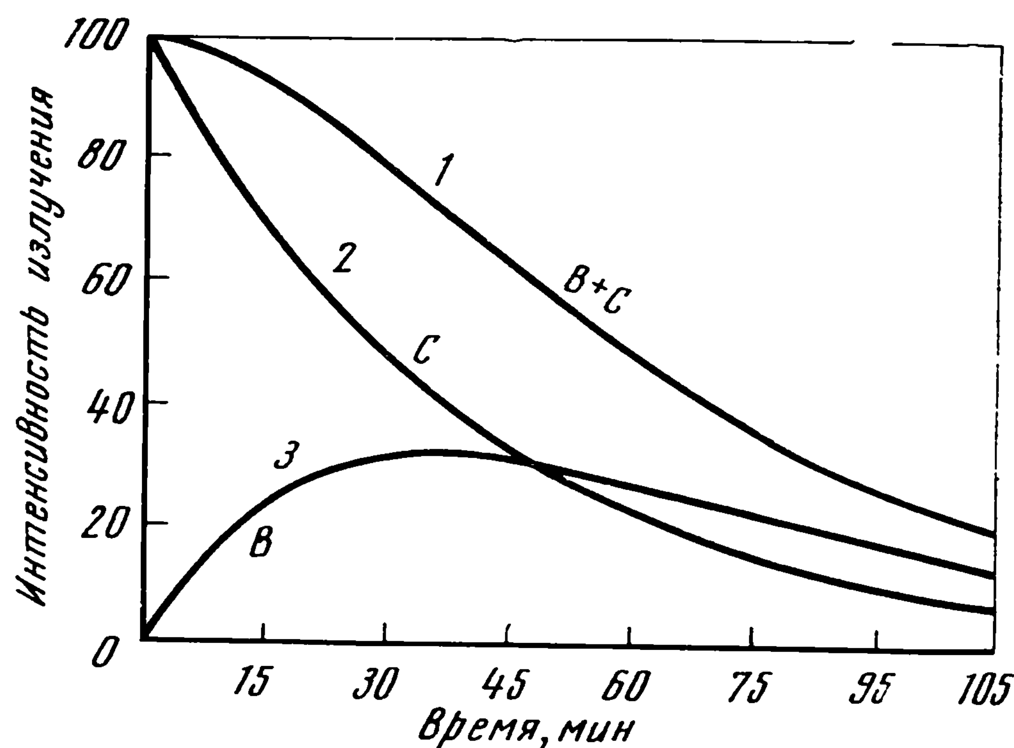


Рис. 11

быть весьма точно выражена эмпирическим уравнением

$$\frac{I_t}{I_0} = ae^{\lambda-\lambda_3 t} - (a-1)\,e^{-\lambda_2 t},$$

где $\lambda_2 = 3{,}10\cdot10^{-4}$ *сек*$^{-1}$; $\lambda_3 = 4{,}13\cdot10^{-4}$ *сек*$^{-1}$; $a = 4{,}20$.

Я нашел, что в пределах ошибок эксперимента это уравнение выражает спад возбужденной активности радия, измеренной по β-лучам при длительной экспозиции. Уравнение, описывающее спад активности, измеренной по α-лучам, значительно отличается от этого уравнения, особенно в начальной части кривой. В течение нескольких часов после удаления тела активность его убывает со временем по экспоненциальному закону, уменьшаясь вдвое за 28 *мин*. Это позволяет определить величину λ_3. Константу a и величину λ_2 можно получить из экспериментальной кривой путем подбора. Мы уже показали (см. раздел 14), что в случае активного осадка тория, в котором происходят два превращения с константами λ_2 и λ_3, из которых лишь второе сопровождается излучением, величина I_t/I_0 после длительной экспозиции [см. уравнение (8)] равна

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_3}\,e^{-\lambda_3 t} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2-\lambda_3}\,e^{-\lambda_2 t}.$$

Это уравнение имеет тот же вид, что и уравнение, полученное эмпирически Кюри и Данном. Подставляя найденные ими величины λ_2 и λ_3, получаем

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_3} = 4{,}3; \qquad \frac{\lambda_1}{\lambda_1-\lambda_3} = 3{,}3.$$

Таким образом, теоретическая формула согласуется с эмпирической не только по форме, но и по величине численных коэффициентов. Если бы оба превращения сопровождались излучением, то формула имела бы такой же вид, но с другими значениями численных коэффициентов, так как они за-

висят от степени ионизации при первом и втором превращениях. Если, например, предположить, что при обоих превращениях появляется одинаковое количество β-лучей, то можно легко вывести уравнение распада:

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{0{,}5\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_3 t} - 0{,}5\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} - 1\right) e^{-\lambda_2 t}.$$

Подставляя в качестве λ_2 и λ_3 значения, найденные Кюри, получаем, что коэффициент при $e^{-\lambda_3 t}$ равен 2,15 вместо 4,3, а вместо коэффициента 3,3 получается коэффициент 1,15. Теоретическая кривая уменьшения активности в этом случае легко отличима от экспериментальной кривой. Можно легко показать, что из формулы убывания активности, найденной Кюри и Данном, следует существование начального безлучевого превращения.

Кривая *1* на рис. 11 — экспериментальная кривая. В момент удаления тела из эманации активное вещество, если не учитывать быстрого начального превращения, должно состоять из веществ *B* и *C*. Рассмотрим вещество, которое в момент удаления существовало в виде *C*. Оно будет претерпевать превращение в соответствии с экспоненциальным законом, причем его активность будет падать вдвое за 28 *мин*. Это показано на кривой *2*. На кривой *3* показана разность ординат кривых *1* и *2*, причем видно, что по форме она аналогична кривой на рис. 5, изображающей изменение β-активности при кратковременной экспозиции. Кривая достигает максимума за то же время, примерно через 36 *мин*. Такое поведение кривой можно объяснить, лишь основываясь на предположении, что первое превращение является безлучевым. Ординаты кривой *3* выражают возрастание активности в результате превращения вещества *B*, накопившегося к моменту удаления из эманации, в вещество *C*. Вещество *B* постепенно превращается в *C*, которое, превращаясь в *D*, вызывает появление излучения. Так как мы рассматриваем только вещество *B*, то изображенное на кривой *3* изменение активности, обусловленное его дальнейшими превращениями, должно совпадать с кривой, получающейся при кратковременной экспозиции, и, как мы уже видели, данное совпадение действительно имеет место.

Совпадение между теорией и экспериментом иллюстрируется табл. 3. Во втором столбце даны теоретические значения активности после длительной экспозиции, рассчитанные по формуле

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_3 t} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_2 t},$$

где приняты численные значения

$$\lambda_2 = 3{,}10 \cdot 10^{-4}; \qquad \lambda_3 = 4{,}13 \cdot 10^{-4}.$$

В третьем столбце приведена наблюдавшаяся величина активности (измеренной с помощью электроскопа) после длительного (24 *час*) воздействия эманации.

Таблица 3

Время, *мин*	Теоретическое значение	Экспериментальное значение	Время, *мин*	Теоретическое значение	Экспериментальное значение
0	100	100	50	59,2	57,0
10	96,8	97,0	60	49,2	48,2
20	89,4	88,5	80	34,2	33,5
30	78,6	77,5	100	22,7	22,5
40	69,2	67,5	120	14,9	14,5

В тех случаях, когда активное тело обдувалось непрерывным потоком воздуха, наблюдаемые значения активности были несколько меньше, чем теоретические. Это, по-видимому, объясняется некоторой летучестью, свойственной продукту радию В при обычных температурах.

18. *Кривые α-активности*. Теперь следует проанализировать кривые убывания возбужденной активности радия, измеренной по α-лучам. Табл. 4 показывает изменение интенсивности излучения после длительного воздействия на тело эманации радия. Платиновая пластинка активировалась в течение нескольких дней внутри стеклянной трубки, содержащей большое количество эманации. После удаления активная пластинка была помещена на нижнюю из двух параллельных изолированных свинцовых пластин. После этого к пластинам было приложено напряжение 600 *в*, достаточное, чтобы ионизационный ток достиг насыщения. Ток был достаточно велик и измерялся при помощи чувствительного гальванометра с высоким сопротивлением. Измерения начинались как можно быстрее после удаления платины из сосуда с эманацией. Начальное значение тока (принятое за 100) было получено экстраполяцией кривой к началу отсчета времени до ее пересечения с вертикальной осью. Он составил $3 \cdot 10^{-8}$ *а*.

Таблица 4

Время, *мин*	Ток	Время, *мин*	Ток	Время, *мин*	Ток
0	100	10	52,0	50	30,4
2	80	15	48,4	60	25,4
4	69,5	20	45,4	80	17,4
6	62,4	30	40,4	100	11,6
8	57,6	40	35,6	120	7,6
				—	—

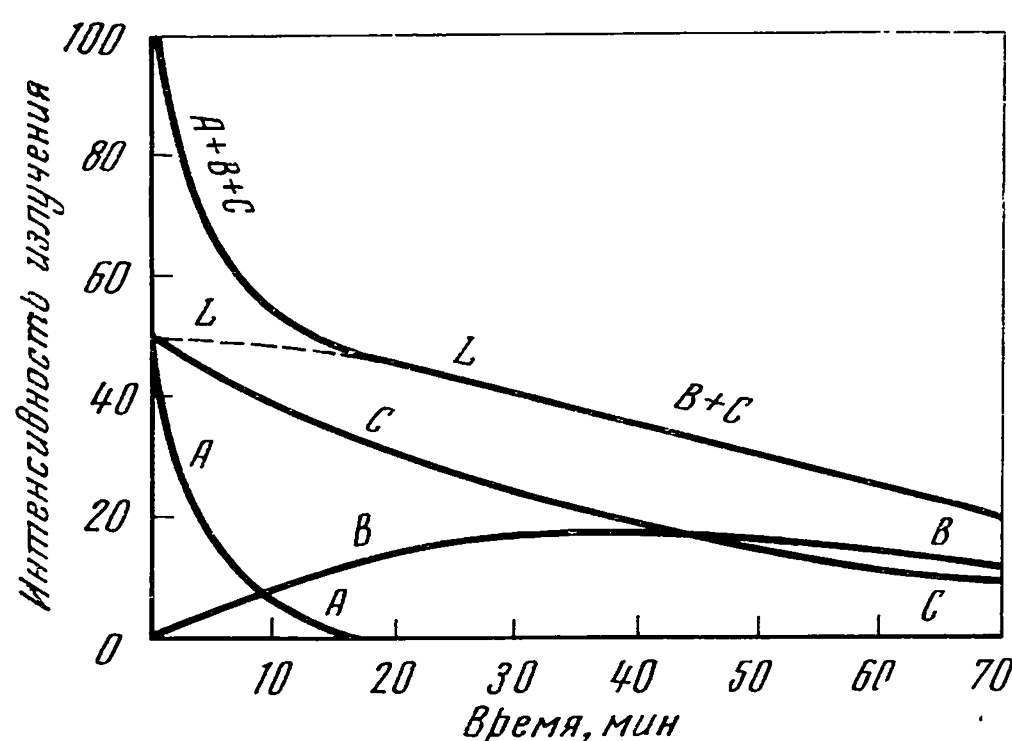


Рис. 12

Эти результаты представлены графически на рис. 12. Быстрое начальное убывание обусловлено спадом активности вещества А. Если из точки этой кривой, соответствующей 20 *мин* после удаления тела, провести прямую, продолжающую общий наклон кривой, то эта прямая пересечет вертикальную ось где-то в районе точки 50. Разность между ординатами кривой $A + B + C$ и кривой L изображается кривой A, которая показывает, как меняется со временем активность, обусловленная превращением радия А. Кривая L, начинающаяся от вертикальной оси, аналогична уже рассмотренной кривой, изображающей убывание активности, измеренной по β-лучам при длительной экспозиции (см. рис. 6). Это подтверждается и совпадением чисел в табл. 5. В первом столбце даны теоретические значения активности, рассчитанные по формуле

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_3 t} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_2 t},$$

где для λ_2 и λ_3 приняты использованные ранее значения. Во втором столбце приведены экспериментальные значения активности, полученные из кривой L.

Таблица 5

Время, *мин*	Теоретическое значение	Экспериментальное значение	Время, *мин*	Теоретическое значение	Экспериментальное значение
0	100	100	50	59,9	60,8
10	96,8	97,0	60	49,2	50,1
20	89,4	89,2	80	34,2	34,8
30	78,6	80,8	100	22,7	23,2
40	69,2	71,2	120	14,9	15,2

Хорошее согласие между кривой L и теоретической кривой, основанной на предположении о существовании двух превращений, первое из которых безлучевое, показывает, что при превращении радия В в С α-лучи отсутствуют. Как и кривая *1* на рис. 11, кривая L может быть аналогичным образом разложена на две составные части, представленные кривыми C и B. Кривая C изображает активность, обусловленную веществом С, накопившимся к моменту удаления из эманации. Кривая B представляет активность, возникающую в результате превращения вещества В в С и идентична соответствующей кривой на рис. 11. Рассуждая, как и прежде, можно сделать заключение, что превращение вещества В в С не сопровождается испусканием α-лучей. Ранее было показано, что при этом отсутствуют и β-лучи, а одинаковое поведение кривых β- и γ-активности показывает, что оно не порождает также и γ-лучей. Таким образом, превращение вещества В в С — превращение «безлучевое», тогда как превращение вещества С в D порождает все три вида лучей.

Таким образом, анализ спада возбужденной активности радия показывает, что в осажденном веществе происходит три отчетливо выраженных быстрых превращения:

1) Вещество А, образующееся в результате превращения эманации, превращается наполовину за 3 *мин* и сопровождается только α-излучением.

2) Вещество В превращается наполовину за 21 *мин* и не порождает ионизующих излучений.

3) Вещество С превращается наполовину за 28 *мин* и сопровождается α-, β- и γ-лучами.

4) Четвертое превращение очень медленное; оно будет рассмотрено в разделе 23.

19. *Формулы, описывающие кривые активности.* Для удобства ниже приведены формулы, описывающие изменение активности во времени с $\lambda_1 = 3{,}8\cdot10^{-3}$, $\lambda_2 = 3{,}10\cdot10^{-4}$, $\lambda_3 = 4{,}13\cdot10^{-4}$.

1) Кратковременная экспозиция; активность измеряется по β-лучам

$$\frac{I_t}{I_0} = 10{,}3\,(e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_2 t}),$$

где I_t — максимальная величина активности.

2) Длительная экспозиция; активность измеряется по β-лучам

$$\frac{I_t}{I_0} = 4{,}3e^{-\lambda_3 t} - 3{,}3e^{-\lambda_2 t},$$

где I_0 — начальная величина активности.

3) Произвольная длительность экспозиции T; активность измеряется по β-лучам

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{ae^{-\lambda_3 t} - be^{-\lambda_2 t}}{a - b},$$

где

$$a = \frac{1 - e^{-\lambda_3 T}}{\lambda_3}; \qquad b = \frac{1 - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_2}.$$

4) Длительная экспозиция; активность измеряется по α-лучам

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{1}{2} e^{-\lambda_1 t} + \frac{1}{2} (4{,}3e^{-\lambda_3 t} - 3{,}3e^{-\lambda_2 t}).$$

Легко могут быть получены формулы для α-активности при произвольной длительности экспозиции, однако при этом получаются довольно громоздкие выражения.

20. *Уравнения, описывающие возрастание возбужденной активности.* Кривые, изображающие постепенное возрастание до максимума возбужденной активности, образованной в теле, подвергавшемся воздействию постоянного количества эманации, являются дополнительными по отношению к кривым убывания активности при длительной экспозиции. Сумма ординат кривых увеличения и уменьшения активности постоянна в любой момент времени. Это с необходимостью следует из теории и может быть выведено *a priori* умозрительным путем [13, стр. 267].

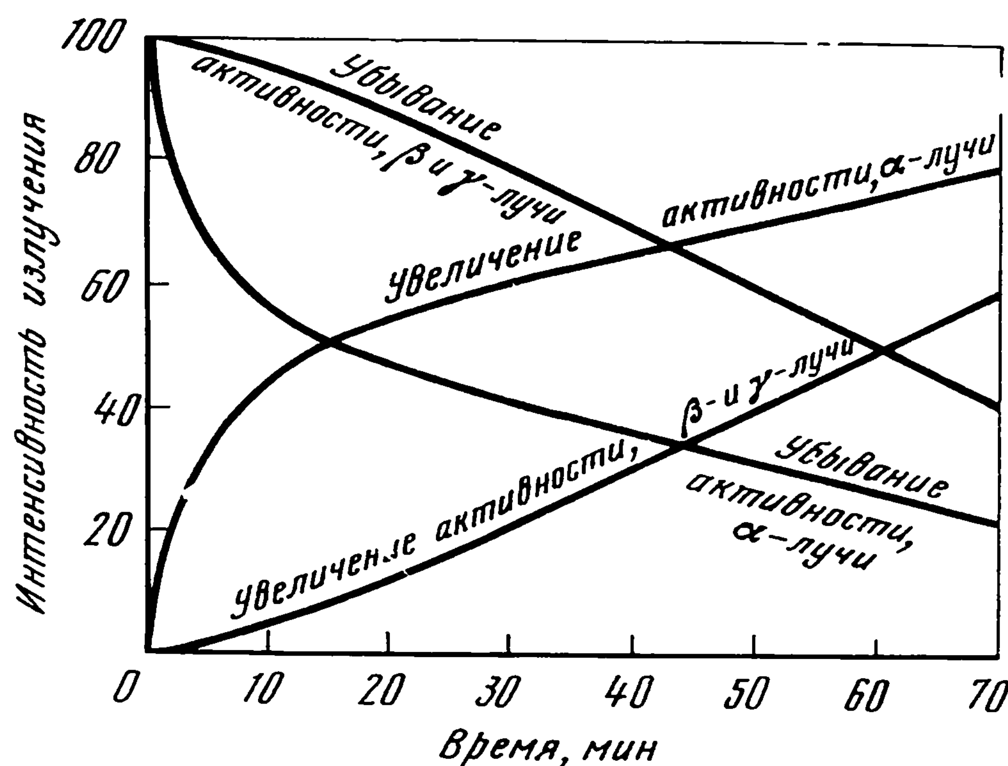


Рис. 13

Кривые возрастания и убывания возбужденной активности, измеренные по α- и β-лучам, изображены на рис. 13. Из этого рисунка отчетливо видно различие между кривыми убывания активности по α- и по β-лучам. Формулы, описывающие возрастание активности до максимума, приведены ниже:

для β- и γ-лучей

$$\frac{I_t}{I_{\max}} = 1 - (4{,}3e^{-\lambda_3 t} - 3{,}3e^{-\lambda_2 t});$$

для α-лучей

$$\frac{I_t}{I_{\max}} = 1 - \frac{1}{2} e^{-\lambda_1 t} - \frac{1}{2} (4{,}3 e^{-\lambda_3 t} - 3{,}3 e^{-\lambda_2 t}).$$

21. *Влияние температуры.* Мы еще не рассматривали данные, которые позволяют сделать заключение, что вещество претерпевает распад с периодом 28 *мин*, а не 21 *мин*. Эти данные были получены в результате недавних важных опытов П. Кюри и Данна [16] по изучению летучести активного вещества, выделяющегося из эманации. Гейтс [21] показала, что это активное вещество улетучивается с платиновой проволоки, нагретой до температуры выше температуры красного каления, и осаждается на поверхности холодного цилиндра, окружающего эту проволоку. Кюри и Данн продолжили эти опыты, подвергая активную платиновую проволоку *кратковременному* воздействию температуры в интервале от 15 до 1350° С и изучая затем кривые спада активности при комнатной температуре не только для радиоактивного вещества, оставшегося на проволоке, но и для его улетучившейся части. Они нашли, что активность остающейся части всегда возрастает после удаления из эманации, достигает максимума и в конечном итоге уменьшается по экспоненциальному закону, уменьшаясь вдвое за 28 *мин*. П. Кюри и Данн показали, что вещество В значительно более летуче, чем С. Первое вещество улетучивается полностью при температуре около 600° С, тогда как второе улетучивается неполностью даже при 1300° С. Тот факт, что вещество С, оставшееся после того, как вещество В полностью улетучилось, распадается вдвое за 28 *мин*, показывает, что именно вещество С, а не В, распадается с такой скоростью.

Кюри и Данн обнаружили также, что скорость распада радиоактивного вещества изменяется в зависимости от температуры, до которой нагрета платиновая проволока. При 630° С наблюдалась обычная скорость распада, при 1100° С активность уменьшается вдвое приблизительно за 20 *мин*, тогда как при 1300° С активность падала вдвое за 25 *мин*.

Я повторил эксперименты Кюри и Данна и получил очень близкие результаты. Можно предположить, что скорость распада, измеряемая после нагревания, изменяется вследствие остаточного возрастания скорости возгонки вещества С при обычных температурах. Однако это объяснение неверно, так как было обнаружено, что активность уменьшается с одинаковой скоростью, независимо от того, находится ли проволока в закрытой трубке или в открытой, продуваемой потоком воздуха.

Эти результаты очень важны, так как они указывают на то, что скорость превращения продукта С—величина непостоянная и зависит от температуры. Это первый случай, в котором оказывается, что температура заметно влияет на скорость превращения радиоактивного продукта.

22. *Роль первого быстрого превращения.* Мы видели, что падение активности, измеренное по β- или γ-лучам, получает вполне удовлетворительное объяснение, если не учитывать первого 3-минутного превращения.

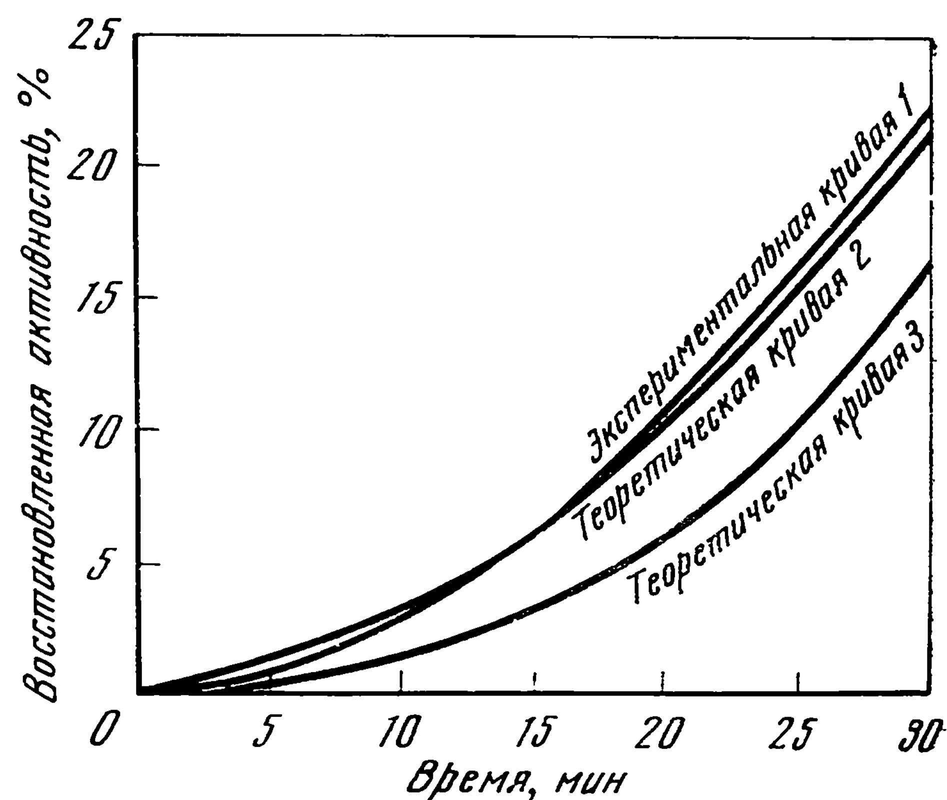


Рис. 14

Однако полное теоретическое рассмотрение этого вопроса, данное в разделах 10 и 11, а также кривые на рис. 8 и 9 показывают, что существование первого превращения должно проявляться столь сильно, что оно может быть обнаружено при измерениях активности, связанной с дальнейшими превращениями. Эта проблема представляет значительный интерес, так как связана с важным в теоретическом отношении вопросом, образуются ли вещества А и В независимо одно от другого или же вещество А порождает вещество В. В последнем случае все имеющееся вещество А превращается в В, и, следовательно, количество вещества В после полного превращения А должно быть несколько больше, чем в том случае, если бы вещество В образовывалось независимо. Поскольку превращение вещества А происходит довольно быстро, его влияние должно быть особенно заметно на начальном участке кривой.

Для экспериментального изучения этого вопроса была снята кривая возрастания β-активности, сразу же после того, как в закрытый сосуд было введено большое количество эманации радия. Кривые спада активности тела после удаления эманации и возрастание активности после ее введения во всех случаях являются дополнительными по отношению друг к другу. Нам трудно измерить с достаточной точностью, действительно ли, например, активность падает за данное время со 100 до 99 или до 98,5, но легко установить, составляет ли соответствующее возрастание активности 1 или 1,5% конечной величины. Кривая *1* на рис. 14 показывает возрастание активности (измеренной по β-лучам) в течение первых 20 *мин* после введения эманации. Ординаты выражают активность в процентах от конечной активности.

Кривая *3* — теоретическая, основанная на предположении, что вещество А порождает В. Она рассчитана по формуле (9) из раздела 11, причем для λ_1, λ_2, λ_3 приняты найденные ранее значения. Кривая *2* дает теоретическое значение активности в зависимости от времени, если предполагать, что вещества А и В образуются независимо одно от другого. Она рассчитывалась по формуле (8), стр. 341.

Видно, что результаты опыта лучше согласуются с гипотезой, что вещества А и В образуются независимо. Однако такой вывод слишком важен, чтобы его можно было принять, не проверив тщательно, соблюдаются ли при опыте теоретические предпосылки. Прежде всего мы предполагали, что носители, вызывающие возбужденную активность, осаждаются на поверхности активируемого тела сразу же после своего возникновения.

Однако имеются данные, что часть носителей, прежде чем образовать осадок на поверхности тела, продолжительное время пребывает в газе. Так, обнаружено, что если на короткое время, примерно на 1 *мин*, ввести тело в сосуд, содержащий эманацию радия, которая в течение нескольких часов не подвергалась никаким посторонним воздействиям, то активность после быстрого начального спада (нижняя кривая на рис. 4) имеет относительно бо́льшую величину, чем та, которая наблюдается, если эманация в течение некоторого времени находилась в электрическом поле. Этот результат показывает, что носители веществ B и C накапливаются в газе и при наличии электрического поля устремляются к электродам. Частично этот эффект может быть обусловлен летучестью вещества B при обычных температурах [1]. Наличие в газе небольших примесей вещества B позволяет объяснить различие между теоретическими кривыми трех последовательных превращений, так как при переходе эманации в другой сосуд примешанное к ней вещество B сразу же начнет превращаться в C и вызовет часть наблюдаемого излучения.

Одинаковая активность продуктов A и C (см. рис. 12) свидетельствует о том, что C есть продукт вещества A, так как в состоянии радиоактивного равновесия количество частиц A, превращающихся в 1 *сек*, равно числу превращающихся за 1 *сек* частиц B или C. Если атомы A и C испускают α-частицы одинаковой массы и одинаковой средней скорости, то активность, обусловленная веществом A, должна быть равна активности, обусловленной веществом C, что, как мы видели, и имеет место. В настоящее время ведутся дальнейшие исследования, которые, как мы надеемся, помогут прояснить этот трудный вопрос.

23. *Очень медленное превращение радиоактивного осадка радия.* Супруги Кюри наблюдали, что тела, подвергавшиеся в течение длительного времени воздействию эманации радия, не теряют полностью активность. Вначале возбужденная активность уменьшается в соответствии с уравнениями, рассмотренными выше, но всегда остается остаточная активность порядка $^1/_{20\,000}$ начальной активности. Эта остаточная активность кажется довольно постоянной, так как не уменьшается в течение 6 месяцев. Гизель наблюдал, что в платиновой проволоке, подвергавшейся действию эманации радия, также имеется остаточная активность: он утверждает, что при этом излучение целиком состоит из α-лучей.

Я исследовал остаточную радиоактивность следующим образом. Эманация от 30 *мг* чистого бромида радия была сконденсирована в небольшой

---

[1] Этот результат подтверждается некоторыми новыми исследованиями, которые провела Брукс [22]. Она показала, что при обычных температурах вещество B летуче, его небольшая часть покидает тело и отлагается на близлежащих предметах. Наблюдалось также, что летучесть вещества B наиболее значительна в течение первых 10 *мин* после удаления тела, т. е. тогда, когда происходит первое превращение. Если вещество A порождает B, то испускание заряженной α-частицы должно привести в движение B, и, следовательно, некоторые из атомов вещества B смогут приобрести скорость, достаточную для того, чтобы покинуть активное тело.

стеклянной трубке, концы которой были запаяны. Через месяц трубка была открыта и оставлена в таком виде на несколько дней, чтобы вся оставшаяся эманация могла улетучиться. Внутренняя часть трубки обнаружила значительную активность. Затем трубка была наполнена разбавленной серной кислотой. Через несколько часов кислоту удалили из трубки и выпарили досуха в плоской стеклянной чашке. Бо́льшая часть радиоактивного вещества, содержавшегося в стеклянной трубке, растворилась в кислоте, и после выпаривания в стеклянной чашке образовался исключительно активный осадок. Это активное вещество испускало и α-, и β-лучи, причем в весьма необычном соотношении. По сравнению с интенсивностью α-лучей доля β-лучей была по крайней мере в 10 раз больше, чем в тонких слоях урана, тория или радия в состоянии радиоактивного равновесия.

Интенсивность α-излучения была измерена в первый раз примерно через 2 месяца после образования активного осадка. При этом активность не изменялась в течение недели. Вследствие ошибки в расчете мы сначала сочли, что в течение следующих 3 месяцев активность также не изменилась, но исправленные результаты показали, что за это время активность увеличилась более чем вдвое. Еще более поздние наблюдения показывают, что α-активность постоянно возрастает.

Увеличение α-активности со временем было подтверждено наблюдениями над остаточной активностью платиновой пластинки, подвергавшейся действию эманации. Результаты показали, что в течение первого месяца после удаления активность значительно увеличивается. Количество β-лучей по отношению к α-лучам непрерывно уменьшается со временем, и это объясняется не уменьшением β-активности, а как раз увеличением α-активности. В настоящее время ведутся дальнейшие наблюдения за изменением активности на протяжении длительных промежутков времени.

Полученные к настоящему времени результаты показывают, что остаточная активность, создаваемая в телах под действием эманации радия, имеет очень сложный характер. Результаты, рассматриваемые нами в следующем разделе, показывают, что высокая β-активность обусловлена веществом, химические свойства которого отличаются от свойств вещества, испускающего α-лучи.

Увеличение α-активности со временем указывает на то, что осажденное вещество претерпевает медленное «безлучевое» превращение. Полученные к настоящему моменту данные позволяют заключить, что осажденное вещество вначале является сложным. Небольшая часть общего количества претерпевает превращение, которое сопровождается лишь β-излучением. Основная часть осажденного вещества претерпевает очень медленное «безлучевое» превращение, а образующийся продукт или продукты испускают α-лучи.

Чтобы определить период этих превращений, требуются очень длительные наблюдения. Вполне возможно, что радий C распадается на два раз-

личных продукта. Затем основная часть этого продукта претерпевает дальнейшее превращение или целый ряд превращений [1].

24. *Связь между медленно распадающимся продуктом и радиотеллуром.* Рассмотрим некоторые данные, указывающие на то, что, по всей вероятности, один из этих медленно распадающихся продуктов радия есть активный компонент радиотеллура, который был выделен Марквальдом из урановой смолки.

Следует отметить, что к полонию, открытому М. Кюри, всегда бывает примешан висмут, который, однако, может быть частично отделен несколькими различными методами. Ранее Гизель обнаружил, что висмутовая пластинка, погруженная в раствор радия, становится постоянно активной и испускает α-лучи, чем она напоминает полоний М. Кюри.

Гизель все время настаивает на том, что полоний — всего лишь «индуцированный висмут», полагая, очевидно, что висмут приобретает радиоактивные свойства под действием раствора радия. Но если мы рассматриваем радиоактивность как результат превращений, претерпеваемых отдельными веществами, то опыты Гизеля показывают, что радиоактивный продукт, выделяясь из раствора радия, отлагается на висмутовой пластинке и что активность пластинки обусловлена вовсе не висмутом, а осажденным на его поверхности радиоактивным веществом.

Марквальд обнаружил, что висмутовая пластинка, погруженная в раствор урановой смолки, покрывается радиоактивным осадком. Сначала он решил, что эта радиоактивность обусловлена осевшим на пластинку теллуром и поэтому назвал его «радиотеллуром». Однако последующие результаты показали, что эта активность не имеет никакого отношения к к радиотеллуру. Соответствующими химическими методами он выделил очень активное вещество. Марквальд утверждает, что радиотеллур испускает только α-лучи и не изменяется сколько-нибудь существенно в течение 6 месяцев после выделения. М. Кюри обнаружила, что радиоактивный компонент висмута, ставшего активным вследствие погружения в раствор, может быть выделен теми же способами, что и полоний, и таким путем ей удалось получить висмут, активность которого в 2000 раз превышала активность урана, однако эта активность уменьшалась со временем.

Теперь рассмотрим некоторые опыты, чтобы установить, существует ли какая-нибудь связь между этим медленно распадающимся продуктом радия и радиотеллуром или полонием.

Радиоактивное вещество, осевшее на стенках стеклянной трубки, в

[1] *10 октября* 1904 г. Дальнейшие эксперименты привели к пересмотру этого заключения. Было обнаружено, что эти результаты можно более удовлетворительно объяснить, если предположить, что радий C образует радий D, который, распадаясь, испускает только β-лучи (и, вероятно, γ-лучи). Радий D образует радий E, который распадается, испуская только α-лучи. Подсчитано, что радий D превращается наполовину, по-видимому, за 40 лет, а радий E—приблизительно за 1 год. Это изменение введено в таблицы, которые будут приведены дальше в тексте. Полное изложение этих экспериментов было сделано на Конгрессе по электричеству в Сент-Луисе (16 сентября 1904 г.) в докладе «Дальнейшие продукты превращения радия».

которой в течение месяца находилось большое количество эманации радия, было растворено в серной кислоте. В этот раствор ввели висмутовую пластинку и оставили ее там на несколько часов. Висмутовая пластинка обнаружила значительную активность и испускала только α-лучи. Когда в раствор была внесена вторая висмутовая пластинка, на ней отложилось очень мало радиоактивного вещества. Оставшийся раствор затем выпарили, и осадок оказался почти таким же активным, как и висмутовая пластинка, он испускал как α-лучи, так и β-лучи. Таким образом, не подлежит сомнению, что растворенное вещество, находящееся на стекле, имеет сложный состав, и одна из его частей, в отличие от другой, осаждается на висмуте. Активность висмутовой пластинки не изменилась сколько-нибудь существенно в течение месяца [1]. Итак, часть активного вещества, полученного из раствора серной кислоты, ведет себя подобно радиотеллуру Марквальда, поскольку испускает только α-лучи и легко осаждается на висмуте. Чтобы подвергнуть это сходство дальнейшей проверке, проводилось тщательное сравнение проникающей способности лучей, испускаемых радиоактивным висмутом и радиотеллуром, осажденным на висмутовой пластинке, полученной от Штамера из Гамбурга. Выяснилось, что лучи поглощаются наполовину алюминиевой пластинкой толщиной 0,00034 *см* и с увеличением толщины поглощающего слоя, как это характерно вообще для всех лучей, поглощение быстро возрастает. Никакого существенного различия в проникающей способности α-лучей от этих двух веществ не наблюдалось, хотя интенсивность излучения была снижена менее чем до 1% от начальной величины. Из экспериментов известно, что лучи, испускаемые различными радиоактивными продуктами, имеют разную проникающую способность и кривая поглощения в зависимости от толщины поглощающего материала, вообще говоря, характерна для каждого продукта.

Идентичность кривых поглощения α-лучей, испускаемых радиоактивным висмутом и радиотеллуром, в сочетании со сходством излучений и химических свойств дает очень веские основания считать, что в обоих случаях мы имеем дело с одним и тем же активным продуктом. Я полагаю, что радиоактивный компонент радиотеллура Марквальда, несомненно, есть продукт распада радия.

Полоний (радиоактивный висмут), полученный мною из Парижа, довольно быстро теряет свою активность, и его α-лучи поглощаются сильнее, чем α-лучи радиотеллура. Однако возможно, что более сильное поглощение вызвано отчасти тем, что излучение полония создается всей массой висмута и вследствие этого состоит из лучей с весьма различной проникающей способностью, тогда как излучение радиотеллура создается тонкой пленкой вещества, осажденного на висмутовой пластинке, в которой поглощение испускаемых лучей невелико. Уже давно и оживленно обсуж-

[1] К сожалению, во время моей поездки в Англию в мае этого года эта висмутовая пластинка была утеряна, и вследствие этого я не могу сказать ничего определенного относительно изменения активности со временем.

дается вопрос о тождественности компонент полония, открытого М. Кюри, и радиотеллура, открытого Марквальдом. Однако определенного ответа на этот вопрос дать нельзя, пока не будут проведены точные измерения изменения активности этих продуктов в зависимости от времени.

25. *Радиоактивность, наблюдаемая в обычном веществе.* Многие экспериментаторы отмечали, что обыкновенное вещество обладает в слабой степени радиоактивностью. Р. Дж. Стрэтт обнаружил, что разные образцы одного и того же металла отличаются по своей радиоактивности. Очень важно определить, является ли эта слабая радиоактивность свойством исследуемых веществ или она обусловлена незначительными радиоактивными примесями. Я думаю, что наблюдавшаяся в некоторых веществах радиоактивность, без сомнения, частично вызвана осаждением на поверхности тел радиоактивного вещества, содержащегося в атмосфере. К настоящему времени убедительно доказано, что в атмосфере присутствует эманация радия. В процессе своего распада эманация образует медленно распадающийся продукт, отлагающийся на поверхности всех тел, находящихся на открытом воздухе. Таким образом, эти тела покрываются невидимой пленкой радиоактивного вещества, скорость превращения которого очень мала. Результаты, полученные Куком [23], подтверждают эту точку зрения. Тщательно отполировав поверхность латунного электроскопа, Кук смог снизить скорость его разряда до $^1/_3$ обычной величины. В этом случае радиоактивное вещество было удалено с поверхности в процессе полировки. Сильная радиоактивность, наблюдаемая в комнате, в которой однажды использовались препараты радия, вероятно, вызвана тем, что на стенках комнаты оседает образующееся из эманации вещество с малой скоростью распада.

26. *Сравнение превращений радиоактивных элементов.* Превращения, происходящие в трех радиоактивных элементах, и сопровождающие их излучения показаны на рис. 15. Излучение актиния еще недостаточно изучено, и мы не можем с уверенностью сказать, сопровождается ли его последнее превращение β- или γ-лучами, как в тории. Мы видим, что радий претерпевает, по меньшей мере, шесть превращений, торий — пять, а уран — два превращения. Первые пять превращений радия во многих отношениях аналогичны соответствующим превращениям тория и актиния. Каждый из этих элементов образует газообразный продукт — эманацию, которая, в свою очередь, превращается в вещество, которое осаждается на поверхности тел. И в радии, и в тории за четвертым превращением следует превращение, в котором появляются все три вида лучей, тогда как третий продукт во всех трех элементах совсем не испускает лучей. Сходство в превращениях, происходящих в радии, тории и актинии, указывает на то, что их атомы очень сходны по своему строению.

Время T, в течение которого превращается половина каждого продукта, величина соответствующей ему постоянной λ и относительное количество продукта, превращающегося за 1 *сек*, представлены в табл. 6, где даны также некоторые физические и химические свойства этих продуктов.

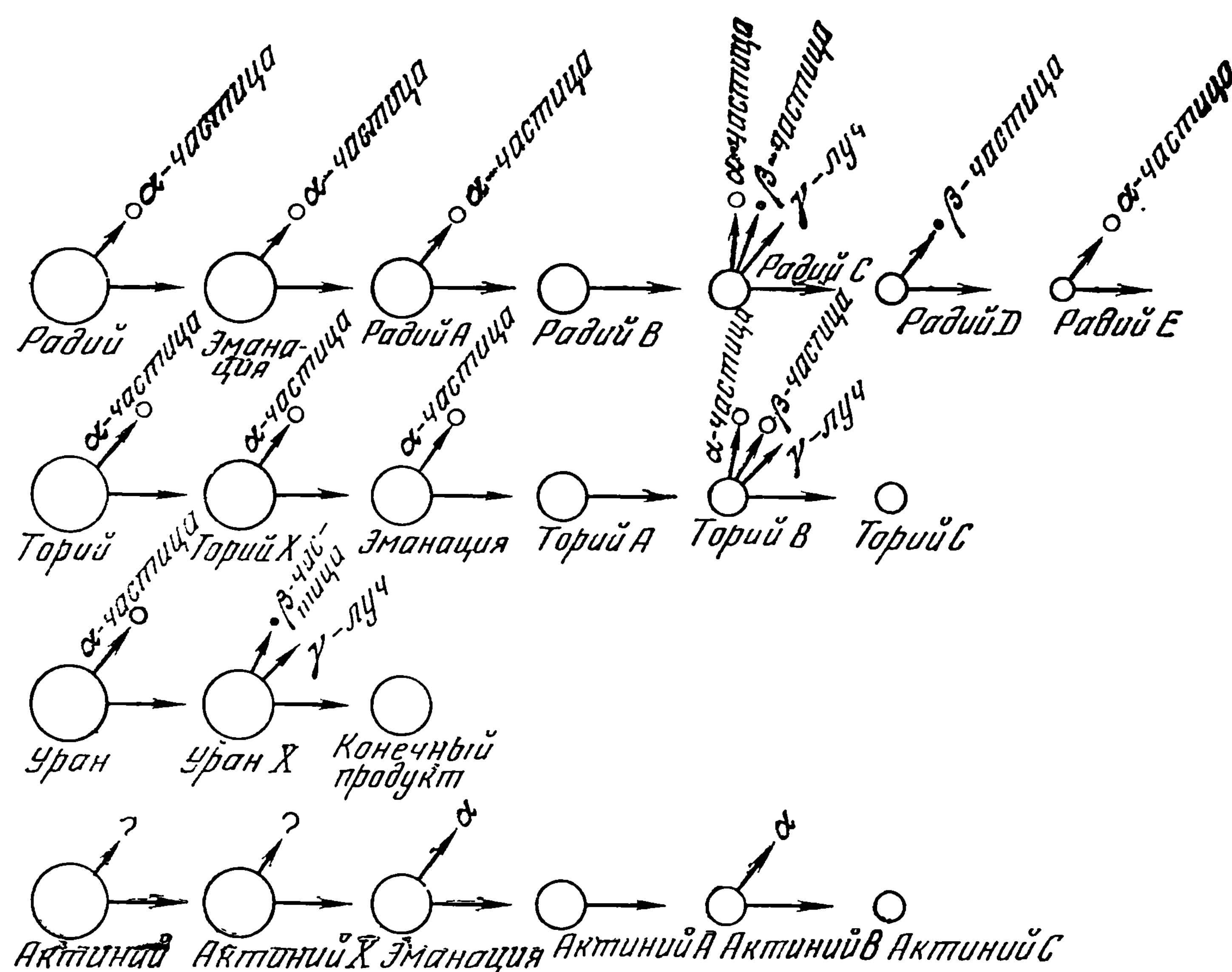


Рис. 15

Величина *T* может рассматриваться как сравнительная мера устойчивости атомов каждого продукта. Атомы эманации радия и тория X имеют примерно одинаковую стабильность. Однако совпадение скоростей распада этих двух продуктов следует считать случайным, оно ни в коем случае не означает, что атомы этих двух продуктов одинаковы, так как ThX и эманация радия различны по своим химическим и физическим свойствам. Если бы атомы этих двух продуктов были одинаковы, то можно было бы ожидать, что последующие превращения будут происходить одинаковым образом и с одинаковой скоростью, чего, однако, не бывает. Устойчивость атомов радиоактивных продуктов колеблется в очень широких пределах. Например, устойчивость атома ThX в 100 000 раз превышает устойчивость эманации актиния. Есть все основания полагать, что сами радиоактивные элементы следует рассматривать как радиоактивные продукты с очень низкой скоростью превращения. Атомы урана, который, по-видимому, превращается наполовину за 1 млрд. лет, должны считаться очень устойчивыми по сравнению с такими продуктами, как эманация радия или тория.

27. *Безлучевые превращения.* Большой интерес и значение представляет существование отчетливо выраженного превращения радия, тория и актиния, не сопровождаемое испусканием α- или β-частиц.

Так как безлучевые превращения не сопровождаются заметной ионизацией газа, их нельзя обнаружить прямыми методами. Тем не менее,

Таблица 6

Продукт	T	λ, *сек*$^{-1}$	Некоторые физические и химические свойства
Уран	10^9 лет	$2{,}2\cdot10^{-17}$	Растворяется при избытке карбоната аммония
↓ Уран X	22 дня	$3{,}6\cdot10^{-7}$	Не растворяется при избытке карбоната аммония
↓ Конечный продукт	—	—	
Торий	$3\cdot10^9$ лет	$7\cdot10^{-18}$	Нерастворим в аммиаке
↓ Торий X	4 дня	$2{,}00\cdot10^{-6}$	Растворим в аммиаке
↓ Эманация тория	1 *мин*	$1{,}15\cdot10^{-2}$	Химически инертный газ, конденсируется при —120° С
↓ Торий A	11 *час*	$1{,}75\cdot10^{-5}$	Ведет себя как твердое тело, нерастворим в аммиаке, улетучивается при нагревании до температуры белого каления, растворим в сильных кислотах. Торий A может быть отделен от тория B с помощью электролиза
↓ Торий B	55 *мин*	$2{,}1\cdot10^{-4}$	
↓ Торий C (конечный продукт)	—	—	
Актиний	—	—	
↓ Актиний X?	—	—	
↓ Эманация актиния	3,7 *сек*	$1{,}87\cdot10^{-1}$	Ведет себя как газ
↓ Актиний A	41 *мин*	$2{,}80\cdot10^{-4}$	Ведет себя как твердое вещество, растворим в сильных кислотах. Актиний A может быть частично отделен от B с помощью электролиза
↓ Актиний B	1,5 »	$7{,}7\cdot10^{-3}$	
↓ Актиний C (конечный продукт)	—	—	
Радий	800 лет	$2{,}8\cdot10^{-11}$	
↓ Эманация радия	4 дня	$2{,}00\cdot10^{-6}$	Химически инертный газ, конденсируется при —150° С, характерный спектр, объем со временем уменьшается.
↓ Радий A	3 *мин*	$3{,}8\cdot10^{-3}$	Ведет себя как твердое тело, растворим в сильных кислотах, улетучивается при нагревании до температуры белого каления; B более летуч, чем A и C, поэтому может быть на некоторое время отделен от них
↓ Радий B	21 »	$5{,}38\cdot10^{-4}$	
↓ Радий C	28 »	$4{,}13\cdot10^{-4}$	
↓ Радий D	Около 40 лет	—	Испускает только β-лучи, растворим в сильных кислотах
↓ Радий E ↓	Около 1 года	—	Вероятно, активный компонент радиотеллура, растворим в сильных кислотах, улетучивается при нагревании до температуры красного каления, отлагается из раствора на висмут

как мы видели, скорость превращения вещества может быть определена косвенным путем по изменению во времени активности последующего продукта. Закон превращения остается тем же, что и для превращения, порождающего α-лучи. Таким образом, безлучевые превращения в некоторых отношениях аналогичны мономолекулярным реакциям в химии, с той разницей, что здесь превращения происходят в самих атомах, а не обусловлены объединением атомов разных веществ в молекулы.

Можно думать, что безлучевое превращение носит не столь бурный характер, как превращение, сопровождающееся испусканием α- или β-частиц. Это превращение можно объяснить, предположив, что в его процессе происходит перегруппировка составных частей атома или что атом распадается, испуская частицы, скорость которых недостаточна для того, чтобы при столкновении с газом вызвать его ионизацию. Если последняя точка зрения правильна, то из нее сразу же вытекает, что превращения подобного рода могут медленно происходить и в нерадиоактивных элементах или, другими словами, что все вещества могут претерпевать медленное превращение. Превращения, происходящие в радиоактивных элементах, обнаруживаются только потому, что части распавшегося атома выбрасываются с большой скоростью. Если бы α-частица вылетала со скоростью, меньшей 10^8 *см/сек*, то ионизации не могло бы произойти и, следовательно, эти превращения нельзя было бы исследовать электрическим методом.

28. *Излучения продуктов распада*. Излучения последовательных продуктов распада радия очень подробно изучены, причем обнаружено, что, за исключением безлучевого превращения, все превращения сопровождаются испусканием α-частиц, обладающих большой скоростью; β- и γ-лучи появляются лишь при пятом превращении. При исследовании тория оказалось, что невозможно полностью освободить продукт ThX от β-лучей, так как трудно полностью отделить его от продуктов последующего превращения. Однако количество β-лучей резко уменьшается, если эманация, образуемая ThX, отводится быстрым потоком воздуха, проходящим через раствор ThX. Сама эманация испускает только α-лучи, но второй продукт, торий B, образующийся из эманации, излучает все три вида лучей. Поэтому удаление части эманации вызывает уменьшение количества β-лучей в составе излучения ThX. Я считаю, что если бы эманация удалялась из ThX сразу же по мере его образования, то, без сомнения, выяснилось бы, что сам ThX порождает только α-лучи, а β- и γ-лучи, как и в случае радия, появляются лишь при пятом превращении.

Примечательно, что β- и γ-лучи урана, тория и радия появляются только при последнем превращении в быстрой смене превращений, претерпеваемых этими телами. Уже указывалось, что β- и γ-лучи появляются всегда одновременно и в одной и той же пропорции. Теперь уже не подлежит сомнению, что γ-лучи — это электромагнитные импульсы, сходные с X-лучами и возникающие в момент внезапного испускания β-частицы из радиоактивного атома.

Во всех трех радиоактивных элементах испускание β-частицы приводит к образованию либо стабильного продукта, либо, как в радии, продукта более устойчивого, нежели предыдущий. Можно отметить, что начальные превращения сопровождаются испусканием только α-частиц и что сразу же после испускания α-частицы компоненты оставшегося атома приходят в состояние довольно устойчивого равновесия с очень малой скоростью распада. Я считаю, что появление β- и γ-частиц только в последнем из быстрых превращений во всех трех радиоактивных элементах не простая случайность.

Вполне вероятно, что β-частицу, которая выбрасывается при конечном превращении, можно рассматривать как активный фактор, способствующий распаду радиоактивного атома на последовательных стадиях. Согласно современным представлениям о строении атома, можно предполагать, что атомы радиоактивных элементов состоят из электронов (β-частиц) и групп электронов (α-частиц), находящихся в состоянии движения и удерживаемых в равновесии взаимными силами.

Для постоянной устойчивости атома необходимо, чтобы движущиеся заряженные части, из которых он состоит, в целом не теряли энергии. Лармор показал, что это условие выполняется, если векторная сумма ускорений движущихся частиц постоянно равна нулю. Если это условие не соблюдается, то должна происходить непрерывная утечка энергии атома в виде электромагнитного излучения. Со временем это должно нарушить равновесие атома и привести к перегруппировке его составных частей или к его окончательному распаду. Можно предположить, что иногда один из внешних вращающихся электронов, составляющих атом, переходит в такое состояние, которое приводит к медленной потере энергии атома в форме излучения. Вследствие этой потери энергии атом становится неустойчивым, и из него, в конце концов, вылетает α-частица, имеющая большую орбитальную скорость. При этом, однако, причина, вызывающая распад атома, еще сохраняется. Следовательно, остаток вновь становится неустойчивым и испускает другую α-частицу. Процесс переходит от этапа к этапу, пока с огромной скоростью не вылетит β-частица.

Следуя общей точке зрения, высказанной недавно О. Лоджем в его недавнем письме в «Nature», можно предположить, что вследствие непрерывного излучения орбитальная скорость β-частиц постоянно увеличивается, пока на последнем этапе не происходит внезапный переход атома в новое состояние, в котором испускается не только α-, но и β-частица. Когда из атома вылетает β-частица, атом переходит в состояние более устойчивого равновесия.

Экспериментальные данные убедительно показывают, что превращение, при котором появляются β-лучи, имеет более разрушительный характер, чем предыдущие, так как не только β-частица вылетает со скоростью, близкой к скорости света, но и α-частица, испускаемая одновременно с ней, имеет бóльшую проникающую способность и, по-видимому, бóльшую кинетическую энергию, чем при других превращениях.

Кроме того, в настоящее время имеются данные, показывающие, что конечное превращение носит столь бурный характер, что в некоторых случаях атом распадается на несколько осколков, каждый из которых обладает характерными физическими и химическими свойствами и характерной скоростью распада. Если бы бо́льшая часть вещества, образующегося при распаде, была одного типа, то по кривым распада было бы трудно обнаружить присутствие небольшого количества быстро превращающегося вещества; но если продукты имеют различное электрохимическое поведение, то в отдельных случаях можно осуществить их частичное разделение с помощью электролиза. Электролитический метод—мощное средство отделения активных продуктов, которые могут присутствовать в малых по сравнению с другими продуктами количествах. В разделе 13 уже упоминалось, что результаты Пегрэма и фон Лерха, полученные при электролизе растворов тория, могут быть частично объяснены на основе предположения, что торий А и торий В характеризуются различным электрохимическим поведением. Кроме того, Пегрэм наблюдал присутствие продукта, который терял половину своей активности приблизительно за 6 *мин*. Этот радиоактивный продукт был получен при электролизе раствора чистой соли тория, к которой было добавлено небольшое количество нитрата меди. Оказалось, что осадок меди обладал небольшой активностью, которая уменьшалась вдвое за 6 *мин*.

Существование таких радиоактивных продуктов, которые не подходят под основную схему превращений, показывает, что на некотором этапе распада может образоваться более чем одно вещество. Такого результата следует ожидать при бурном распаде радия С и тория В, так как вполне возможно, что существует несколько способов расположения составных частей атома при образовании нестабильной системы. Два радиоактивных продукта, образующиеся при распаде одиночного атома, будут, вероятно, присутствовать в неравных пропорциях. Возможно, что более подробное изучение радиоактивных тел приведет к выделению целого ряда радиоактивных веществ, присутствующих в малых количествах среди основных продуктов распада.

29. *Различие между радиоактивным и химическим превращениями*. Последовательные превращения, происходящие в радиоактивных элементах, во многих важных отношениях отличаются от обыкновенных химических превращений. Мы видели, что каждый радиоактивный продукт, предоставленный самому себе, распадается по определенному закону и с определенной скоростью. Закон превращения аналогичен закону мономолекулярной химической реакции. Это показывает, что в превращении участвует только одна система. Постоянная превращения λ не зависит от степени концентрации продукта, от наличия и природы окружающего газа и в большинстве случаев не изменяется даже при больших изменениях температуры. Однако работа Кюри и Данна показывает, что постоянная λ продукта радия С (см. раздел 21) определенно изменяется под действием температуры. После того как это вещество в течение нескольких минут под-

вергалось действию температуры 1100° С, величина λ (при охлаждении до обычной температуры) *постоянно изменяется*. Значение λ при 1100° С в 1,4 раза больше обычной величины. При температуре выше 1100° С величина λ вновь уменьшается и при 1300° С составляет 1,1 обычной величины. Эти результаты показывают, что повышение температуры до определенного предела вызывает увеличение скорости распада радия С, но при дальнейшем повышении температуры скорость распада снова уменьшается и становится почти равной обычному значению.

Радиоактивное превращение отличается от обычного химического двумя особенностями: 1) испусканием заряженной частицы, обладающей большой скоростью; 2) выделением огромного количества энергии по отношению к количеству превращающегося вещества.

Неизвестно ни одного химического превращения, за исключением трех радиоактивных элементов, в котором продукт превращения обладал бы огромной скоростью. В каждом превращении, сопровождаемом испусканием α-лучей, освобождается количество энергии, которое в расчете на единицу веса в 100 000 раз превышает количество энергии, наблюдавшееся когда-либо в любой химической реакции. Барнс и автор настоящей статьи [24] показали, что 75% теплового излучения радия создается эманацией и ее дальнейшими продуктами. Эманация, выделенная 1 *г* радия, излучает теплоту со скоростью 75 *кал/час*. Общее количество теплоты, выделяющееся за время ее существования, равно примерно 10 000 *кал*. Из работ Рамзая и Содди известно, что объем эманации, которую выделяет 1 *г* радия, не превышает 1 *мм*^{3}. Поэтому энергия, испускаемая 1 *см*^{3} эманации радия, равна 10^7 *кал*, тогда как количество теплоты, выделяющейся при образовании воды из 1 *см*^{3} водорода и кислорода, составляет 2 *кал*. Таким образом, в процессе своего превращения эманация выделяет в $5 \cdot 10^6$ раз больше теплоты, чем равное по объему количество кислорода и водорода при образовании воды. Энергия, излучаемая из сосуда, содержащего эманацию радия, распределяется почти поровну между эманацией и ее продуктами — радием А и радием С. Каждый из этих продуктов испускает α-лучи. Возможно, что «безлучевой» продукт — радий В — испускает меньше теплоты, чем другие продукты.

Кажется почти бесспорным, что энергия, испускаемая радием, распределяется почти поровну между продуктами, распад которых сопровождается испусканием α-частиц, т. е. при распаде радия, эманации, радия А и радия С выделяется соответственно по 25% общего теплового излучения. Излучаемая энергия, по всей видимости, обусловлена главным образом кинетической энергией испускаемых α-частиц. Так как продукты урана, тория и актиния испускают α-частицы почти с той же скоростью, что и радий, то отсюда необходимо следует, что каждый атом радиоактивных продуктов, распадающийся с испусканием α-частицы, выделяет примерно одно и то же количество энергии. Для каждого атома на каждой стадии его распада это количество энергии составляет примерно $6 \cdot 10^{-6}$ *эрг*.

Поскольку торий и радий претерпевают одинаковое число превраще-

ний, тепловой эффект тория будет пропорционален его активности, т. е. будет составлять $5 \cdot 10^{-7}$ от теплового эффекта такого же количества радия.

С тех пор как Рамзай и Содди обнаружили, что эманация радия образует гелий, многие были склонны рассматривать гелий как конечный продукт превращения радия. Нет никаких данных, подтверждающих такое заключение, так как мы уже видели, что атом радия претерпевает ряд медленных превращений после того, как уже произошли первые быстрые превращения, во время которых появляется гелий. Имеющиеся данные свидетельствуют также в пользу той точки зрения, что на каждом этапе распада из каждого атома, за исключением, вероятно, лишь «безлучевого» превращения, вылетает только одна α-частица. После испускания четырех α-частиц, масса которых примерно равна массе атома гелия, масса остающегося атома все еще велика. Ранее я указывал, что α-частицы, по всей вероятности, состоят из атомов гелия, вылетающих на последовательных этапах распада. Это заключение подтверждается измерениями массы α-частицы, а также экспериментами Рамзая и Содди по измерению скорости образования гелия из эманации радия.

Сходство между α-частицами от различных радиоактивных элементов указывает на то, что они состоят из частиц одного типа. С этой точки зрения все радиоактивные элементы должны образовывать гелий. Наличие гелия в минералах, содержащих торий, как, например, в монацитовом песке и в цейлонском минерале, описанном Рамзаем, позволяет предположить, что гелий есть продукт и тория, и радия.

Принимая гипотезу, что α-частицы представляют собой атомы гелия, мы должны рассматривать атомы радиоактивных элементов как соединения некоторого известного или неизвестного вещества с гелием. Эти соединения самопроизвольно распадаются, причем скорость их распада, даже радия, очень мала. Распад происходит последовательными этапами, и почти на всех этапах испускаются очень быстрые атомы гелия. Этот распад сопровождается излучением огромного количества энергии. Высвобождение такого большого количества энергии объясняет тот факт, почему скорость превращения не зависит от имеющихся в нашем распоряжении физических и химических факторов. Согласно этой точке зрения, уран, торий и радий в действительности — соединения гелия. Однако в этих соединениях гелий так сильно связан, что химические или физические силы не могут их разрушить и, следовательно, эти тела ведут себя как химические элементы в обычном смысле.

Вполне возможно, что многие из так называемых химических элементов могут оказаться соединениями гелия или, иными словами, что атом гелия есть одна из тех структурных единиц, из которых построены атомы более тяжелых элементов.

30. *Заряд, переносимый α-лучами.* Чтобы определить число атомов, распадающихся в 1 *сек*, очень важно как можно более прямым способом установить, сколько частиц испускается определенным количеством радия. Самый прямой путь для определения этого числа — это измерить

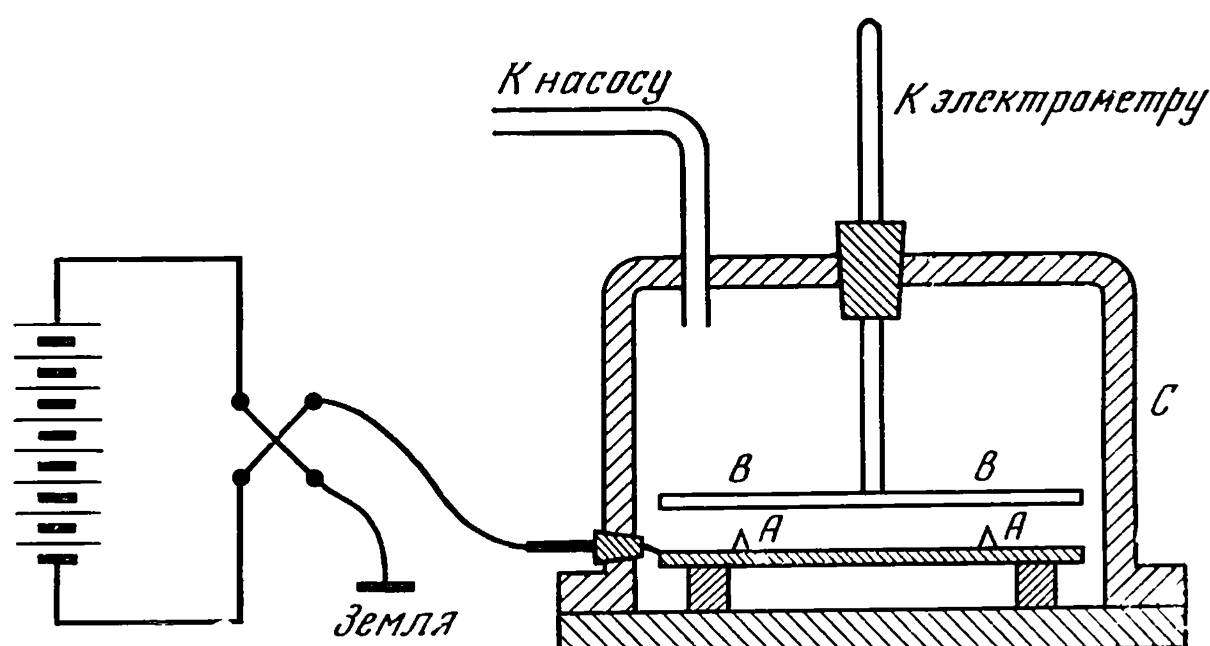


Рис. 16

заряд, переносимый α-лучами. Если предположить, что заряд α-частицы равен по величине заряду ионов в газах, то можно сразу же определить количество α-частиц, испускаемых за 1 *сек.*

При выпаривании раствора бромида радия известной концентрации на пластинке была получена тонкая пленка радия. Через несколько часов после выпаривания активность радия, измеренная по α-лучам, составляла 25% ее максимального значения, а β-излучение почти отсутствовало. Схема экспериментальной установки показана на рис. 16.

Активная пластинка *A* помещена внутри металлического сосуда *C* изолированно от него. Один полюс батареи подсоединялся к этой пластинке, другой был заземлен. Изолированная верхняя пластинка *B* соединялась с электрометром Долежалека. Наружный сосуд *C* мог быть заземлен или соединен с пластинками *A* или *B*. С помощью ртутного насоса сосуд *C* был откачан до очень низкого давления. Если бы α-лучи несли положительный заряд, ток между пластинками, измеряемый электрометром, должен был бы быть больше, когда пластинка *A* была заряжена положительно, чем тогда, когда она была заряжена отрицательно. Однако даже в условиях очень хорошего вакуума никакой заметной разницы в величине тока при разной полярности источника мы не заметили. Кроме того, было обнаружено, что вначале ток между пластинами быстро уменьшался с уменьшением давления, а затем достигал предельного значения, которое уже не изменялось при дальнейшем уменьшении давления. Эти результаты весьма трудно интерпретировать. Без сомнения, α-частица ведет себя как положительно заряженное тело, поскольку она отклоняется в магнитном и электрическом полях в направлении, противоположном по сравнению с β-частицей. Возможно, нам не удалось обнаружить заряд, переносимый α-лучами, отчасти потому, что они создают значительную вторичную ионизацию на поверхности пластин *A* и *B*. Ток, обусловленный этим эффектом, достигнув некоторого предела, перестает уменьшаться с уменьшением давления и, по-видимому, не изменяет-

ся, если воздух заменить водородом. В то же время на основе оценки количества частиц от 1 *г* радия, приведенной в разделе 31, мы приходим к выводу, что, несмотря на поверхностную ионизацию, заряд, переносимый α-частицами, должен был бы обнаруживаться при перемене направления электрического поля.

Было поставлено большое число опытов в различных условиях, но все они дали отрицательный результат. Приходится предположить, что α-частицы действительно несут положительный заряд, но действие этого заряда каким-то образом полностью нейтрализуется. В этой связи важно отметить, что заряд, переносимый каналовыми лучами, не обнаружен до сих пор, несмотря на тщательные опыты, проведенные Вином. Кажущееся отсутствие заряда у α-частиц можно было бы объяснить, если бы одновременно в то же время происходило испускание такого же количества отрицательно заряженных частиц, или электронов, обладающих небольшой скоростью. Если бы электроны имели примерно такую же проникающую способность, как α-частицы, то их присутствие было бы трудно обнаружить электрическим методом, так как ионизация, создаваемая α-частицами, маскировалась бы ионизацией, создаваемой электронами. Электрон должен легко отклоняться электрическим полем, и в настоящее время проводятся эксперименты с целью обнаружить следы положительного заряда α-частиц, когда на них действует сильное магнитное поле.

31. *Некоторые количественные соотношения, имеющие место при радиоактивном превращении радиоактивных элементов.* Я показал [13, стр. 154—158], что в состоянии радиоактивного равновесия 1 *г* радия за 1 *сек* испускает приблизительно 10^{11} α-частиц. Эта величина есть среднее значение из оценок, рассчитанных тремя способами, основанными на: 1) заряде, переносимом α-лучами; 2) энергии, необходимой для образования одного иона; 3) количестве ионов, образуемых α-частицей на 1 *см* пути.

Эту оценку можно проверить, подсчитав тепловой эффект радия. Можно почти с уверенностью сказать, что тепловой эффект радия вызывается главным образом бомбардировкой радия испускаемыми им частицами. Так как для α-частицы $e/m = 6{,}3\cdot 10^3$, а скорость $v = 2{,}5\cdot 10^9$, то кинетическая энергия α-частицы равна

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\frac{m}{e}v^2e = 6\cdot 10^{-6}\ \textit{эрг},$$

если принять заряд $e = 3{,}4\cdot 10^{-10}$ *эл.-стат. ед.*

Скорость теплового излучения 1 *г* радия равна 100 *кал/час*, что эквивалентно $1{,}2\cdot 10^6$ *эрг/сек*. Если предположить, что тепловой эффект обусловлен кинетической энергией испускаемых α-частиц, то для выделения такого количества тепла в 1 *сек* должно вылетать $2\cdot 10^{11}$ α-частиц. Эта величина хорошо согласуется с приведенной выше оценкой. Зная количество α-частиц, испускаемых в 1 *сек*, можно подсчитать объем эманации, запасенной в 1 *г* радия. Для расчета примем, что каждый атом, распадаясь,

образует одну α-частицу и один атом последующего продукта. Это подтверждается тем, что на каждый активный продукт радия приходится почти одинаковая доля полной активности, т. е. каждый активный продукт испускает почти одно и то же количество лучей. Далее, α-лучи испускаются самим радием, эманацией и продуктами — радием А и радием С. Количество медленно распадающихся продуктов — радия D и радия E — слишком мало, чтобы принимать их во внимание. Таким образом, на каждый распадающийся атом радия приходится четыре α-частицы. Следовательно, каждую секунду происходит распад $2{,}5 \cdot 10^{10}$ атомов радия. В состоянии радиоактивного равновесия количество n атомов эманации радия, приходящейся на 1 *г* радия, определяется формулой $n/q = 1/\lambda$, где q — количество атомов эманации, распадающихся за 1 *сек*, или, что то же самое, количество атомов радия, распадающихся за 1 *сек*, а λ — радиоактивная постоянная. Так как для эманации $1/\lambda = 500\,000$, а $q = 2{,}5 \cdot 10^{10}$, то $n = 1{,}25 \cdot 10^{16}$. Таунсенд показал, что $Ne = 1{,}25 \cdot 10^{10}$, где N — число молекул водорода в единице объема при нормальном давлении и температуре.

Принимая значение $e = 3{,}4 \cdot 10^{-10}$ *эл.-стат. ед.*, найденное Дж. Дж. Томсоном, мы получаем $N = 3{,}6 \cdot 10^{19}$. Объем эманации от 1 *г* радия равен n/N *см*^{3}, что составляет $1{,}25 \cdot 10^{16}/3 \cdot 10^{19}$, или $3{,}5 \cdot 10^{-4}$ *см*^{3} при нормальном давлении и температуре.

Рамзай и Содди недавно выделили эманацию радия и определили, что объем, полученный из 1 *г* радия, равен 1 *мм*^{3}. Таким образом, расчетный объем по порядку величины согласуется с экспериментальными данными. Между этими результатами наблюдалось бы еще лучшее совпадение, если бы мы приняли количество α-частиц равным не 10^{11}, а $2 \cdot 10^{11}$ — величине, рассчитанной по тепловому эффекту радия. Возможно, что объем, полученный Рамзаем и Содди, завышен вследствие тех трудностей, которые возникают при отделении эманации от малых примесей других газов.

Итак, мы можем с достаточной уверенностью заключить, что за 1 *сек* из 1 *г* радия вылетает примерно $2 \cdot 10^{11}$ частиц и что количество атомов, распадающихся за 1 *сек*, составляет $5 \cdot 10^{10}$ на 1 *г* радия.

Так как 1 *см*^{3} водорода содержит $3{,}6 \cdot 10^{19}$ молекул, можно легко подсчитать, что 1 *г* радия содержит $1{,}8 \cdot 10^{21}$ атомов, если принять атомный вес радия равным 225.

Таким образом, относительное количество радия, распадающееся за 1 *сек*, составляет $5 \cdot 10^{10}/1{,}8 \cdot 10^{21}$, или $2{,}8 \cdot 10^{-11}$, т. е. $8{,}8 \cdot 10^{-4}$ в год. Итак, за год из 1 *г* радия распадается почти 1 *мг*.

Существуют все основания полагать, что количество радия, распадающегося за 1 *сек*, как и в случае всех радиоактивных продуктов, всегда пропорционально имеющемуся количеству радия. Если N_0 — количество атомов, имеющихся вначале, то количество N_t в произвольный момент времени t определяется формулой $N_t/N_0 = e^{-\lambda t}$, где λ — относительное количество радия, распадающегося за 1 *сек*, т. е. для радия имеем $\lambda = 2{,}8 \cdot 10^{11}$ *сек*$^{-1}$, или $8{,}8 \cdot 10^{-4}$ в год.

Время, за которое радий превращается наполовину, составляет примерно 800 лет, тогда как *среднее время жизни* радия равно λ^{-1}, или примерно 1100 лет.

Далее, активность чистого бромида радия превышает приблизительно в 2 млн. раз активность урана, а активность тория в пересчете на одинаковый вес примерно такая же, как у урана. Принимая в первом приближении, что активность пропорциональна количеству испускаемых частиц, можно легко подсчитать, что для тория, который, как и радий, имеет четыре продукта, испускающих α-лучи, среднее время жизни λ^{-1} равно $1100 \cdot 2 \cdot 10^6$, или $2 \cdot 10^9$ лет.

Для урана, у которого по всем данным имеется только одно превращение с испусканием α-частиц, среднее время жизни в 4 раза меньше, т. е. $5 \cdot 10^8$ лет.

Поскольку каждый радиоактивный атом испускает одну α-частицу, атомный вес которой близок к атомному весу водорода или гелия, атомы промежуточных продуктов мало отличаются по весу от материнского атома.

Можно легко рассчитать примерное весовое содержание каждого продукта в 1 *г* радия. Пусть N_A, N_B, N_C — количества атомов продуктов A, B, C, присутствующих в 1 *г* в состоянии радиоактивного равновесия. Пусть λ_A, λ_B, λ_C — константы соответствующих превращений. Тогда, если q — количество распадов материнских атомов за 1 *сек*,

$$q = \lambda_A N_A = \lambda_B N_B = \lambda_C N_C.$$

В случае радия величина $q = 5 \cdot 10^{10}$ на 1 *г*. Значение N для каждого из продуктов, а также вес этого продукта приведены в табл. 7.

Таблица 7

Продукт	λ, *сек*$^{-1}$	Количество атомов на 1 *г*	Вес продукта, *мг*
Эманация радия	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$	$2{,}5 \cdot 10^{16}$	$1{,}4 \cdot 10^{-2}$
↓ Радий A	$3{,}8 \cdot 10^{-3}$	$1{,}3 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{-6}$
↓ Радий B	$5{,}4 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{-5}$
↓ Радий C	$4{,}1 \cdot 10^{-4}$	$1{,}2 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{-5}$

С учетом тех малых количеств радия, которые имеются в распоряжении исследователя, количества полученных продуктов, радия A, B и C, слишком ничтожны, чтобы их можно было взвесить. Однако может оказаться возможным обнаружить их присутствие с помощью спектроскопа.

Вес продукта тория ThX, присутствующего в наибольшем количестве по сравнению с другими продуктами, еще более мал, чтобы его можно было обнаружить. Поскольку значение λ для ThX примерно то же, что и у эманации радия, максимальный вес ThX в 1 *г* тория в $2 \cdot 10^6$ раз меньше веса эманации на 1 *г* радия и составляет, таким образом, около 10^{-11} *г*. Даже в 1 *кг* тория количество ThX слишком ничтожно, чтобы его можно было взвесить.

Полученные к настоящему времени данные убедительно свидетельствуют о том, что испускаемые α-частицы после нейтрализации их заряда становятся атомами гелия. Если это действительно так, то можно сразу же оценить объем гелия, образующегося из радия за год. Поскольку α-частицы испускаются эманацией, радием А и радием С, то объем гелия, образующегося за время жизни эманации, должен быть втрое больше объема исходной эманации. Экспериментально трудно измерить объем образующегося гелия ввиду его поглощения стенками трубки. Однако эксперименты Рамзая и Содди показывают, что по порядку величины теоретическое и экспериментальное значения совпадают. За 1 *сек* испускается $2 \cdot 10^{11}$ атомов гелия, а за год образуется $6{,}3 \cdot 10^{18}$ атомов, поэтому объем гелия, образующегося из 1 *г* радия за год, равен $6{,}3 \cdot 10^{18}/3{,}6 \cdot 10^{19}$, или 0,18 *см*^{3}.

32. *Происхождение радиоактивных элементов.* Мы видели, что за год претерпевает распад $^1/_{1000}$ данного количества радия, а половина этого количества распадается за 800 лет. Через 8000 лет останется только $^1/_{1000}$, а через 16 000 лет всего $1/10^6$ исходного количества радия. Таким образом, если бы вся Земля первоначально состояла из чистого радия, то через 16 000 лет ее активность не превышала бы активности хорошего образца теперешней урановой смолки. Поскольку возраст радиоактивных минералов, несомненно, значительно больше, мы вынуждены заключить, что радий образуется из какого-то источника и что его количество поддерживается на постоянном уровне вследствие непрерывного образования нового радия, которое уравновешивает его распад.

Вопрос о возможном источнике радия обсуждался автором в работе [13, стр. 334], где было показано, что уран лучше всех соответствует условиям, которым должно удовлетворять вещество, порождающее радий. Во-первых, его среднее время жизни равно $5 \cdot 10^8$ лет, т. е. намного больше среднего времени жизни радия. Кроме того, активность урановой смолки примерно такая же, как следовало бы ожидать, если бы уран порождал радий. Если каждый атом урана, распадаясь, образует один атом радия, то активность урана и его продуктов (измеренная по α-лучам) должна была бы быть примерно в 6 раз больше активности самого урана. Это следует из того, что каждый атом урана при распаде испускает только одну α-частицу, тогда как радий, образующийся из него, должен испускать во время своих превращений пять α-частиц (включая α-частицу от радия Е).

Если учесть, что, кроме урана и радия, в урановой смолке содержится

торий и актиний, то наблюдаемая активность, которая в 6—7 раз превышает активность урана, почти соответствует той, которая должна была бы быть, если бы радий был продуктом урана.

Далее, из данных раздела 31 можно легко рассчитать количество радия, образующегося по этой гипотезе за год. Относительное количество урана, претерпевающего превращение в течение года, составляет около $2 \cdot 10^{-9}$. Если предположить, что уран превращается в радий, проходя через стадии быстрого превращения, то количество радия, образующегося за год, по весу должно быть равно количеству распавшегося урана, т. е. $2 \cdot 10^{-9}$ *г*. Эманация, образуемая этим количеством радия, могла бы разрядить обычный электроскоп за 10 *мин*, т. е. можно было бы обнаружить даже очень небольшую часть упомянутого количества. Если бы использовался не 1 *г* урана, а 1 *кг*, то количество эманации, образующейся за год, составило бы $2 \cdot 10^{-6}$ *г*. Эманация от такого количества радия разрядила бы электроскоп почти мгновенно и можно было бы легко обнаружить радий, образующийся за один день.

Предположение, что уран—возможный родитель радия, было выдвинуто в работе [4], и мы с Содди решили, что Содди проведет эксперименты с целью определить, образуется ли радий из урана. Содди уже опубликовал предварительные данные о своих экспериментах [25]. Он не обнаружил никаких доказательств того, что радий образуется из урана, и рассчитал, что если радий вообще образуется из чего-либо, то это происходит со скоростью, в 100 тыс. раз меньшей теоретического значения.

Со своей стороны я исследовал торий и актиний, чтобы определить, не они ли образуют радий. Предполагалось, что актиний мог бы быть промежуточным продуктом между ураном и радием. Теоретические оценки для тория были малообещающими, однако тот факт, что чистый нитрат тория, полученный от Кнеффлера из Берлина, выделял значительное количество эманации радия, заставил меня исследовать не только актиний, но и торий.

Около 500 *г* нитрата тория было растворено в воде. К нему было примешано незначительное количество нитрата бария, а затем добавлено достаточное количество серной кислоты, чтобы выпал осадок сульфата бария. После двух последовательных осаждений вместе с барием был удален почти весь радий. Затем исследуемый раствор тория был помещен в закрытый стеклянный сосуд, где в воздушном пространстве над поверхностью раствора могла накапливаться эманация. Время от времени воздух откачивали и впускали в соответствующим образом устроенный электроскоп. Наблюдаемая скорость разряда пропорциональна количеству имеющейся эманации и поэтому могла служить удобным средством для регистрации изменения количества радия в растворе.

Аналогичным образом было растворено в кислоте некоторое количество выделяющего эманацию вещества Гизеля, и радий был осажден с барием. Раствор был помещен в закрытую бутыль, и время от времени определялось количество эманации.

Наблюдения над актинием проводились 3 месяца, а над торием — 4. Сначала казалось, что наблюдается некоторое изменение количества радия, находящегося в актинии и тории, но более поздние наблюдения показали, что если при этом и образуется радий, то это происходит со скоростью, намного меньше теоретической. Исследования тория и актиния продолжаются, и можно надеяться, что через несколько лет можно будет дать определенный ответ на этот вопрос.

В экспериментах подобного рода необходимы некоторые предосторожности, чтобы избежать возможных ошибок при определении количества эманации по скорости разряда электроскопа. Источники таких ошибок особенно заметны в опытах с растворами тория или актиния. Эманации из этих веществ улетучиваются в воздушное пространство над раствором. Если там имеется пыль или капельки воды, то в них образуется возбужденная активность. При отсосе воздуха эти активные частицы удаляются вместе с ним и, если они не успевают осесть или не будут удалены фильтрацией через вату, вносятся в электроскоп, вызывая увеличение скорости разряда. Я обнаружил, что если эту пробу воздуха поместить на час в газгольдер над поверхностью воды, то газ очищается от носителей возбужденной активности. После этого на электроскоп будет действовать только одна эманация.

В настоящее время нет никаких экспериментальных доказательств того, что радий образуется из урана, тория или актиния. Однако вполне возможно, что отрицательные результаты, получавшиеся до сих пор, объясняются существованием одного или нескольких безлучевых превращений между материнским веществом и радием. Мы наблюдали такие «безлучевые» превращения в радии, тории и актинии. Неудачи попыток обнаружить образование радия можно было бы объяснить тем, что промежуточные «безлучевые» продукты удаляются во время химической процедуры по очистке вещества от радия.

Имеется прямой метод подхода к решению этого вопроса. Если уран порождает радий, то количество радия в различных образцах урановой смолки должно быть всегда пропорционально количеству урана [1]. Аналогичным образом можно ответить на вопрос о происхождении других радиоактивных элементов.

Вообще проблема происхождения радиоактивных элементов и их взаимосвязи имеет большое значение. Большое сходство между превращениями радия, тория и актиния весьма примечательно. Оно указывает на некоторые особенности атомного строения, которые еще ждут своего объяснения.

---

[1] Недавно Болтвуд [26] опубликовал некоторые данные, доказывающие, что в исследованных образцах урановой смолки количество радия строго пропорционально количеству урана в минерале. Необходимо получение дальнейших результатов подобного рода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rutherford E.*, *Soddy F.* Phil. Mag., September, 1902.
2. *Rutherford E.*, *Soddy F.* Phil. Mag., November, 1902.
3. *Rutherford E.*, *Soddy F.* Phil. Mag., April, 1903.
4. *Rutherford E.*, *Soddy F.* Phil. Mag., May, 1903.
5. *Ramsay W.* Proc. Roy. Soc., June, 1904, 470.
6. *Ramsay W.* Compt. Rend., June 6, 1904, **138**.
7. *Rutherford E.* Phil. Mag., February, 1904.
8. *Rutherford E.* Phil. Mag., January, 1903.
9. *Rutherford E. Brooks G.* Phil. Mag., July, 1902.
10. *Curie P., Danne.* Compt. rend., 1903, **136**, 364.
11. *Brooks G.* Phil. Mag., September, 1904.
12. *Rutherford E.* Phys. Zs. 1902, **3**, 254.
13. *Rutherford E.*, *Barnes G.* Phil. Mag., February, 1904.
14. *Rutherford E.*. Treatise on Radioactivity.
15. *Curie P.*, *Danne.* Compt. Rend., 1904, **138**, 683.
16. *Curie P.*, *Danne.* Compt. Rend., 1904, **138**, 748.
17. *Pegram.* Phys. Rev., December, 1903, 424.
18. *Von Lerch* Ann. Phys. November, 1903.
19. *Brooks G.* Phil. Mag., September, 1904.
20. *Debierne.* Compt. Rend., 1904, **138**, 411.
21. *Gates.* Phys. Rev., 1903, 300.
22. *Brooks G.* Nature, July 21, 1903.
22. *Cooke.* Phil, Mag. August, 1903.
24. *Rutherford E.*, *Barnes G.* Phil. Mag., February, 1904.
25. *Soddy F.* Nature, May, 1904.
26. *Boltwood B.* Nature, May, 80, 1904.

18

ИЗЛУЧЕНИЕ И ЭМАНАЦИЯ РАДИЯ *

ЧАСТЬ I

Прошло немногим более семи лет с тех пор, как Беккерель открыл свойство урана самопроизвольно испускать излучения, способные проникать через вещества, непрозрачные для света, воздействовать на фотопластинки и разряжать наэлектризованные тела. Тем не менее наши знания за это время удивительно быстро расширились и сейчас собрана огромная информация не только об излучении радиоактивных тел, но и о сложных процессах, происходящих в них. Одновременно была разработана теория, связывающая воедино целый ряд экспериментальных явлений.

Вскоре после открытия Беккерелем радиоактивных свойств урана было обнаружено, что радиоактивен и редкий элемент торий. Исследование урановой смолки показало наличие ряда новых радиоактивных тел, которые обладают гораздо большей радиоактивностью, нежели уран и торий. Из этих тел вещество *актиний*, открытое Дебьерном, по-видимому, окажется новым элементом, активность которого сравнима с активностью радия, тогда как радиоактивные элементы, присутствующие в *полонии*, открытом М. Кюри, и *радиотеллур*, открытый Марквальдом, пока химически не отделены. Наибольшее внимание привлекло к себе вещество *радий*, открытое в 1898 г. супругами Кюри в урановой смолке. Частично это было обусловлено тем, что это вещество представляет собой новый элемент с определенным спектром и атомным весом, но в основном — его удивительными радиоактивными свойствами, так как интенсивность его излучения почти в 2 млн. раз больше интенсивности излучения такого же количества урана.

Большая часть наших современных знаний о радиоактивности получена при изучении сравнительно слабых радиоактивных тел — урана и тория. Радиоактивные свойства тория качественно подобны свойствам радия, но отличаются очень сильно по интенсивности. В этой статье, для краткости, будут рассмотрены только свойства радия, хотя приведенные рассуждения во многих случаях применимы также и к другим радиоактивным телам.

Характеристические излучения, испускаемые радием, невидимы для глаза, но, когда они падают на определенные флуоресцирующие вещест-

---

* Technics, July, 1904, 11—16.

ва, они частично трансформируются в свет. Обычный рентгеновский экран из цианоплатинита бария начинает светиться в темной комнате, когда на него падают лучи, испускаемые радием. Минерал *виллемит* (силикат цинка) сильно светится под действием лучей, испускаемых несколькими миллиграммами бромида радия. Излучая красивый зеленоватый свет, он кажется совершенно прозрачным. Другой минерал *кунцит* под действием излучения приобретает приятный розовый цвет, однако интенсивность его свечения не столь велика, как виллемита или цианоплатинит бариевого кристалла.

Испускаемое радием излучение по своему характеру очень сложно и состоит из трех видов лучей, называемых α-, β- и γ-лучами. Бо́льшая часть испускаемых лучей не имеет сходства с обычными световыми волнами, а состоит из летящих материальных частиц, испущенных с огромной скоростью. Природа β-лучей была выяснена первой вследствие той легкости, с какой они отклоняются магнитом. Если поместить небольшое количество бромида радия в основании маленького свинцового цилиндра, то конус лучей, вылетающих из открытого конца, создает светящуюся дорожку на виллемите или рентгеновском экране, расположенном неподалеку. Наблюдаемое свечение в основном создается β-лучами. Поднося к радию магнит, можно видеть, как светящаяся дорожка отклоняется и сильно расширяется. При повороте магнита направление отклонения дорожки изменяется. Уширение конуса лучей в магнитном поле свидетельствует о сложности характера испускаемых лучей: некоторые отклоняются магнитным полем сильнее, чем другие. Таким же способом обнаружено отклонение лучей при прохождении между двумя параллельными пластинами, между которыми с помощью электрической машины создана большая разность потенциалов. В этом и других отношениях β-лучи подобны лучам, которые вырываются из катода, когда через вакуумную трубку пропускается сильный электрический разряд.

Путем измерения величины отклонения катодных лучей при прохождении через магнитные и электрические поля известной напряженности Дж. Дж. Томсон показал, что они состоят из летящих частиц, несущих отрицательный заряд электричества и вылетающих со скоростью около 50 000 *миль/сек*. Частицы, вырываемые из катода,— это самые маленькие тела, известные науке, так как их масса составляет всего $\sim{}^1/_{1000}$ массы атома водорода. Испущенные радием β-частицы имеют тот же размер, что и частицы катодных лучей, но вылетают со значительно большей средней скоростью. Кауфман показал, что некоторые частицы обладают начальной скоростью свыше 170 000 *миль/сек*, т. е. их скорость почти равна скорости света.

Исключительной проникающей способностью обладают γ-лучи, испущенные радием, ибо их присутствие легко обнаруживается за свинцовым экраном толщиной несколько дюймов или железным толщиной в 1 *фут*. Они не отклоняются магнитным или электрическим полем и сейчас практически нет сомнений в том, что они представляют собой вид очень

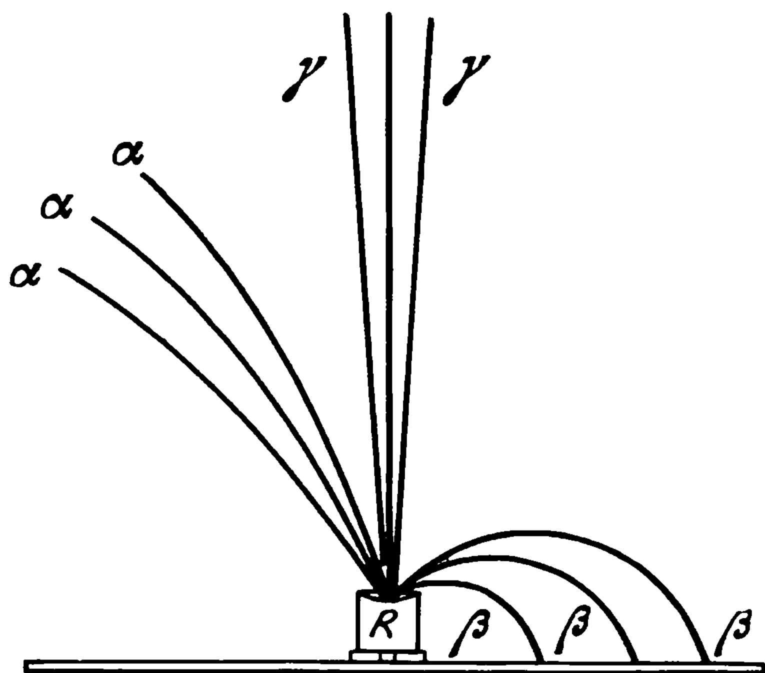


Рис. 1

сильно проникающих лучей Рентгена. Согласно Стоксу и Дж. Дж. Томсону, лучи Рентгена — это очень короткие поперечные волны, или колебания эфира, возникающие, когда частица из катодного луча внезапно останавливается, наталкиваясь на препятствие. Следует ожидать, что лучи Рентгена будут возникать как при резком ускорении заряженной частицы, так и при резком торможении. Эти соображения приводят к выводу, что γ-лучи возникают в момент выбрасывания β-частицы из атома радия. Таким образом, в противоположность β-лучам, γ-лучи носят не корпускулярный характер, а более сродни очень коротким световым волнам.

Очень слабой проникающей способностью обладают α-лучи, они поглощаются при прохождении нескольких сантиметров воздуха или тонким листом бумаги. Долгое время считалось, что они не испытывают отклонения в магнитном и электрическом полях. Однако в 1902 г. автор настоящей работы обнаружил, что α-лучи могут быть отклонены с помощью очень сильного магнитного или электрического полей. Направление отклонения было, однако, противоположным отклонению β-лучей, что указывало на то, что α-частицы несут не отрицательный, а положительный заряд электричества. Измерения величины отклонения лучей при прохождении через магнитное и электрическое поля известной напряженности позволили установить, что α-частицы испускаются со скоростями около 200 000 *миль/сек* и имеют массу, равную примерно двум массам атома водорода. Если α-частицы состоят из какого-либо известного вида вещества, то это атомы водорода или гелия, поскольку гелий — легчайший известный науке атом после водорода. Этот результат особенно важен для вопроса об образовании гелия из радия, который будет рассмотрен позднее.

Основное явление радиоактивности заключается в способности радия непрерывно и самопроизвольно испускать с огромными скоростями тяжелые частицы вещества атомных размеров. Каждая частица имеет скорость, в 40 000 раз превышающую скорость пули из винтовки, так что ее энергия движения огромна по сравнению с массой движущегося тела.

Лучи, испущенные радием, очень похожи на лучи, образующиеся при сильном электрическом разряде в вакуумной трубке, β-лучи подобны катодным лучам, γ-лучи напоминают лучи Рентгена, а α-лучи очень похожи на «каналовые» лучи, открытые Гольдштейном. Чтобы образовать эти лучи в вакуумной трубке, необходимы большие затраты электрической энергии. Радий испускает их самопроизвольно, без какого-либо, насколько мне известно, внешнего возбудителя.

	Масса	Скорость	Энергия
α	○	—	⊗
β	•	——	•

Рис. 2

Действие магнитного поля, приводящее к разделению лучей, испущенных радием, схематически изображено на рис. 1. Радий R помещен в небольшой свинцовый сосуд, из которого испускаются α-, β- и γ-лучи в виде конуса лучей. Если перпендикулярно к плоскости бумаги приложить магнитное поле так, чтобы поле было направлено вниз, то β-лучи отклоняются направо, α-лучи — налево, а γ-лучи не отклоняются совсем. Величина отклонения α-лучей по сравнению с β-лучами на рисунке для наглядности сильно увеличена.

Сравнительные размеры, скорость и энергия движения α- и β-частиц графически показаны на рис. 2. Скорости изображены черточками, а масса и энергия — кружочками.

Энергия движения α-частиц много больше энергии движения β-частиц. Кроме того, имеются данные, свидетельствующие о том, что на каждую β-частицу испускается четыре α-частицы, так что почти вся излучаемая радием в виде лучей энергия уносится α-частицами. Значение α-частиц огромно и не только с точки зрения излучаемой энергии, но и потому, что они играют чрезвычайно большую роль в сложных процессах, которые происходят внутри атома радия. Можно подсчитать, что каждый грамм радия испускает за секунду около 100 000 млн. α-частиц, но в 1 *г* вещества существует столь огромное число атомов, что процесс может продолжаться годы, прежде чем заметная часть вещества будет унесена частицами.

Скорость вылета α- и β-частиц под влиянием каких-либо имеющихся в нашем распоряжении физических или химических воздействий не изменяется заметным образом. При температуре жидкого воздуха скорость остается такой же, как и при нагревании докрасна.

Непрерывное испускание α-частиц радием очень хорошо иллюстрируется прекрасным экспериментом, проведенным Вильямом Круксом. Если небольшое количество радия поместить около экрана, покрытого сернистым цинком, то под воздействием α-лучей поверхность экрана начнет светиться. Если посмотреть на экран через увеличительное стекло, то видно, что свечение не однородно, а состоит из большого числа вспышек света, возникающих и исчезающих очень быстро. Это сразу наводит наблюдателя на мысль, что экран подвергается интенсивной бомбардировке, причем удар каждой частицы по мишени отмечается вспышкой света. Тяжелые α-частицы имеют по сравнению со своими размерами такую огромную энергию движения, что они при ударе производят изменения в кристалле сернистого цинка (вероятно, расщепление), которое и сопровождается вспышкой света.

Наиболее важное свойство излучения радиоактивных тел — их способность разряжать наэлектризованные тела. Это свойство было исполь-

зовано для точного измерения излучений и в настоящее время представляет собой наиболее точный способ обнаружения свойства радиоактивности в телах. Если содержание радия в 1 *г* неактивного вещества составляет *не более одной десятимиллиардной части*, то его присутствие может быть быстро обнаружено по его способности разряжать электроскоп с золотыми листочками. Эта способность лучей объясняется образованием положительных и отрицательных заряженных частиц, или ионов, как они называются, в электрически нейтральном газе, через который проходит излучение. Энергия движения α- и β-частиц столь велика, что при столкновении с оказавшимися на их пути молекулами газа они образуют ионы.

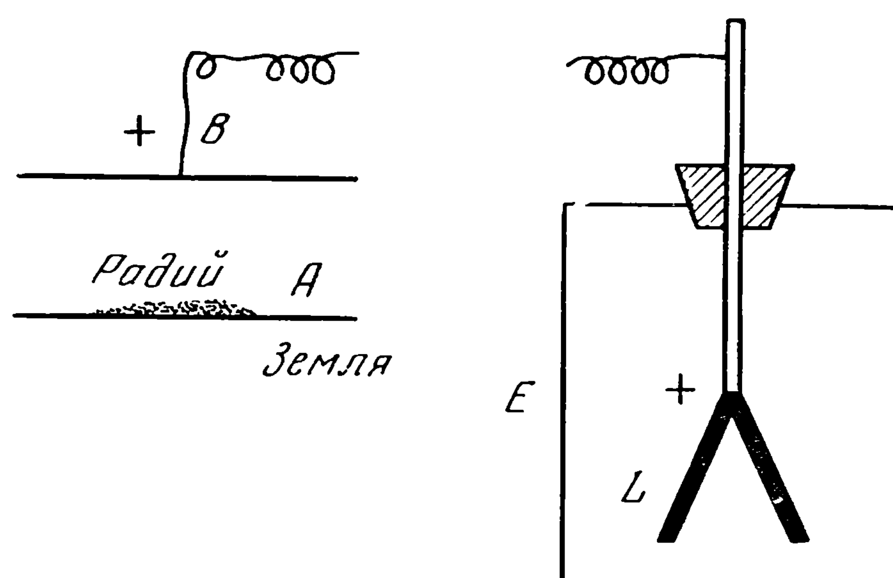


Рис. 3

Каждая испущенная частица способна образовать много тысяч ионов, прежде чем она истратит всю энергию. Эти ионы движутся в электрическом поле и вызывают наблюдаемую потерю заряда.

Если небольшое количество бромида радия поместить на пластине *A* (рис. 3) вблизи пластины *B*, которая с помощью проводника подсоединена к электроскопу с золотыми листочками *E*, то заряд очень быстро исчезает и листочки *L* быстро опускаются. В основном эффект разряда наэлектризованных тел обусловлен α-частицами. Если поверх радия поместить лист бумаги, то α-частицы почти полностью поглотятся в нем и эффект разряда будет обусловлен β- и γ-лучами. Если радий полностью закрыть свинцовым экраном толщиной около 5 *мм*, то будут задерживаться почти все β-лучи и разряд электроскопа будет обусловлен воздействием одних γ-лучей. Вообще говоря, α-лучи намного более эффективно создают разряд и свечение тел, нежели более проникающие β- и γ-лучи. Однако β-лучи сильнее всех засвечивают фотопластинку.

Кюри и Лаборд недавно показали, что радий обладает поразительным свойством непрерывно поддерживать свою температуру на 4 или 5° F выше температуры окружающего воздуха. Это свидетельствует о том, что кроме излучения радий испускает энергию в виде тепла. Количество тепла от 1 *г* радия соответствует примерно 100 *кал/час*. Фунт радия выделял бы в год такое количество тепла, которое получается при сгорании примерно

100 фунтов угля. Это очень примечательный результат, ибо в конце года в радии не будет заметно никакого изменения и он все с той же скоростью будет выделять тепло. Согласно измерениям Кюри и Дьюара, скорость излучения тепла не изменяется, если радий находится при температуре жидкого водорода.

Это излучение тепла на самом деле непосредственно связано с радиоактивностью радия, а отнюдь не независимое явление. Нет сомнения в том, что излучение тепла есть прямое следствие непрерывного испускания радием α-частиц. Они легко поглощаются при прохождении через вещество, и в небольшом кусочке радия только несколько процентов от общего числа

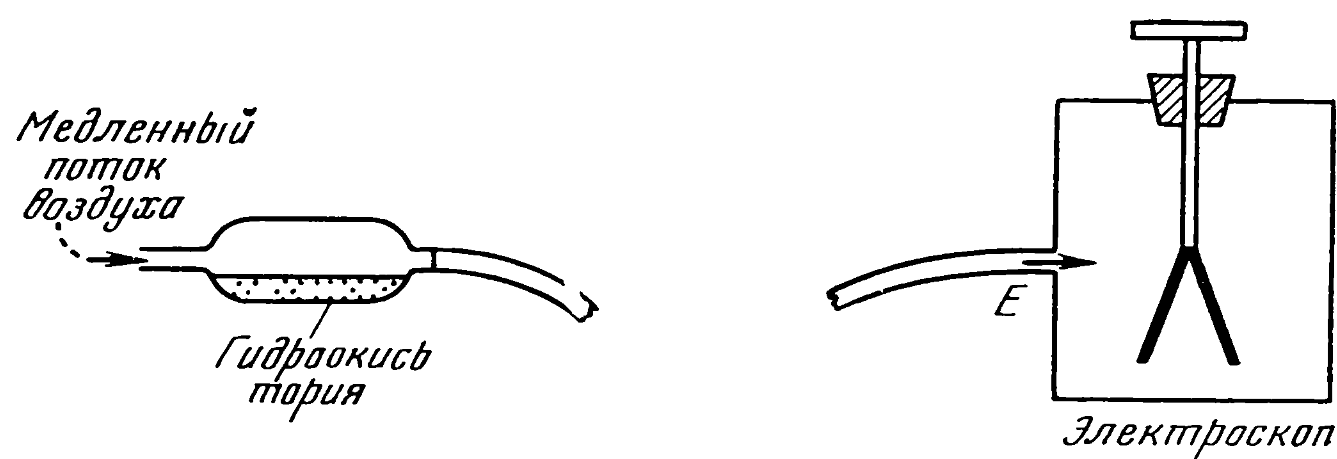


Рис. 4

испущенных α-частиц способны вылететь в окружающий газ. Остальные поглощаются в массе самого радия. Таким образом, радий интенсивно и непрерывно бомбардируется собственными α-частицами. Подобно тому как мишень нагревается при ударе попадающих в нее пуль, так и радий нагревается в результате собственной бомбардировки. Часть излученного тепла, вероятно, получается за счет распада атомов, приводящих к испусканию α-частиц.

Радий не только излучает три вида лучей и непрерывно испускает тепло, но и выделяет еще радиоактивную «эманацию», или газ. Эта эманация образуется в незначительном количестве, однако по отношению к количеству самого вещества она является чрезвычайно мощным излучателем энергии. Это свойство выделения эманации впервые было замечено автором на радиоактивном элементе тории. Если слабый поток воздуха проходит через трубку (рис. 4), содержащую порошкообразную окись тория, или, лучше, гидроокись тория, а затем еще через несколько ярдов трубок и выходит в электроскоп E, то золотые лепестки электроскопа очень быстро опускаются. Эманация, смешанная с воздухом, поступает в электроскоп и испущенное ею излучение ионизует газ и вызывает опускание лепестков. Если поток воздуха прекращается, скорость разряда уже через минуту уменьшается вдвое. Аналогичный эффект наблюдается, если вместо тория поместить радиевый раствор, но вследствие огромной активности радия эффект этот оказывается гораздо более интенсивным. Эманация,

полученная из *одной миллионной грамма* бромида радия, заставляет лепестки опадать за несколько секунд, и поэтому можно легко измерить количество эманации из *одной десятимиллиардной доли грамма*. Это свойство радия выделять эманацию используется во многих наиболее точных и определенных методах обнаружения и оценки микроскопических количеств радия. Эманацию тория очень легко отличить от эманации радия, активность которой спадает медленнее. Излучающая способность эманации радия уменьшается вдвое через 4 дня, но даже через месяц ее все еще можно обнаружить в закрытом сосуде.

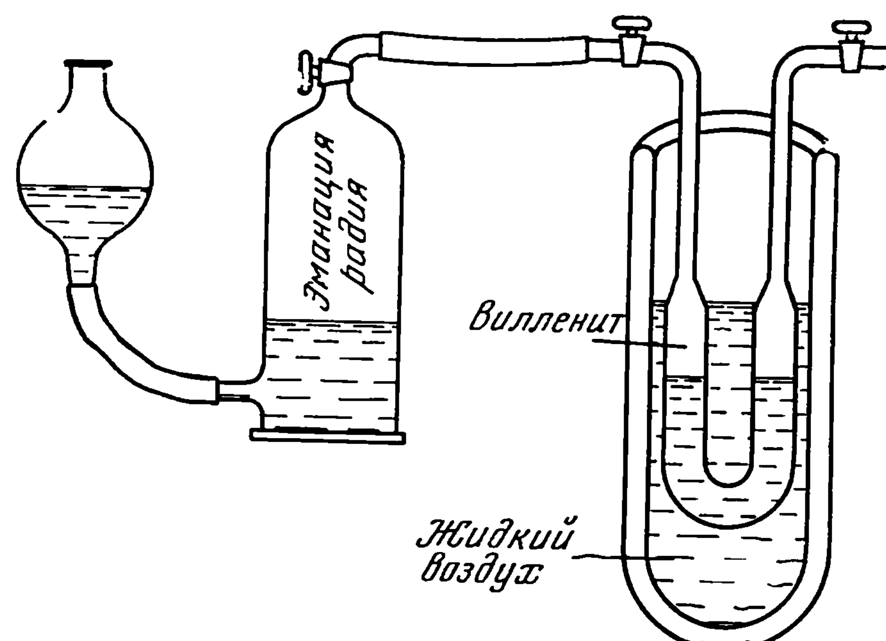


Рис. 5

Эманации тория и радия были множество раз исследованы. Было показано, что они способны диффундировать в воздухе подобно тяжелому газу и не реагируют ни с одним из известных химических веществ. Содди и автор настоящей работы обнаружили, что эманации тория и радия могут быть сконденсированы подобно газам под действием сильного охлаждения. Эманация тория конденсируется при —120° С, а эманация радия при —150° С.

Процесс конденсации большого количества эманации радия можно наблюдать визуально. Простой эксперимент такого рода показан на рис. 5. Некоторое количество эманации собирается в небольшом газометре с помощью пробулькивания воздуха через раствор радия. Затем эманация, перемешанная с воздухом, пропускается через стеклянную U-образную трубку, погруженную в жидкий воздух, содержащийся в сосуде Дьюара. Чтобы показать присутствие эманации, U-образную трубку частично заполняют небольшим количеством виллемита. По мере того как эманация медленно проходит по U-образной трубке, она конденсируется в трубке как раз под уровнем жидкого воздуха. Излучение, испущенное сконденсированной эманацией, вызывает свечение виллемита; при значительном количестве эманации свечение становится очень ярким. При очень слабом потоке воздуха излучение конденсируется в той точке U-образной трубки,

где входит воздух, а остальная часть трубки не светится совсем. Если закрыть концы трубки и вынуть ее из жидкого воздуха, то сконденсированная эманация испаряется как только температура возрастает выше —150° C, при этом начинает светиться вся трубка. По мере того как эманация внутри трубки теряет свою активность, свет из трубки постепенно слабеет, но спустя месяц все еще заметен.

Если эманацию, после того как она находилась в U-образной трубке в течение нескольких часов, вынести потоком воздуха, свечение виллемита не пропадает сразу, а продолжается несколько часов. Это непрерывное свечение связано с замечательным свойством, которым обладает эманация. Это свойство заключается в *образовании самой эманацией нового вида радиоактивного вещества, которое не газообразно, а ведет себя как твердое тело* и осаждается на поверхности тел. Тела, которые выдерживались в течение некоторого времени в присутствии эманации, ведут себя так, как если бы они были покрыты тонкой невидимой пленкой сильно радиоактивного вещества. Этот осадок растворяется в кислотах, снимается при нагревании добела и вообще ведет себя как вещество с определенными химическими свойствами. Осадок продолжает излучать в течение нескольких часов. Этим свойством «возбужденной», или «наведенной» в соседних телах активности обладают и эманация радия, и эманация тория. Возбужденная активность, образованная торием, наблюдается намного дольше, чем активность, возбужденная эманацией радия, и бывает заметна через несколько дней после того, как эманация удалена.

Если трубка, в которой накапливается эманации радия, наполнена слоями различных веществ, которые светятся под действием излучения, можно очень ясно видеть различия в интенсивности и цвете свечения. Виллемит сияет прекрасным зеленым светом, а кунцит — темно-красным. Сернистый цинк светится белым цветом. Кристаллы цианоплатинита бария вначале светятся так же, как виллемит, но цвет и свечение кристаллов быстро меняются в результате химического воздействия на них лучей. Свечение виллемита и сернистого цинка обусловлено в основном α-лучами, тогда как кунцит более чувствителен к β- и γ-лучам.

Трубка, содержащая эманацию радия, временно обладает всеми свойствами радия. Она испускает β- и γ-лучи, а также интенсивно излучает тепло. Сконденсированная эманация светится в темноте и вызывает фосфоресценцию стекла. Под ее воздействием быстро темнеют стенки стеклянной трубки, в которой она заключена, и она может способствовать протеканию характерных химических реакций некоторых веществ. Если эманацию собрать над водой, то с большой скоростью выделяются кислород и водород. Все эти эффекты создаются чрезвычайно малыми количествами эманации. Вильям Рамзай и Содди недавно успешно отделили эманацию от радия и измерили ее объем. Они рассчитали, что 1 *г* радия содержит около 1 *мм*^{3} эманации, если измерения проводятся при атмосферном давлении и температуре. Эманация имеет все обычные свойства газа. Она обладает определенным спектром, но отличается от других газов тем, что ее объем

уменьшается со временем. Эманация нестабильна, но непрерывно превращается в твердое вещество, которое осаждается на стенках сосуда, в котором она находится. Но самая замечательная особенность эманации заключается в ее огромной мощности излучения по сравнению с ее весом. Барнс и автор данной работы недавно показали, что $^3/_4$ суммарного теплового эффекта радия обусловлено небольшим количеством накопленной в радии эманации. Для выделения эманации радий нагревали, а затем эманацию путем конденсации собирали в маленькую стеклянную трубочку, погруженную в жидкий воздух. Содержащая эманацию трубочка сияла в темноте и очень быстро выделяла тепло, тогда как радий, из которого была выделена эманация, потерял три части своего теплового эффекта. Эманация теряет свой тепловой эффект с той же скоростью, с какой она теряет активность, т. е. тепловой эффект уменьшается вдвое за 4 дня и почти пропадает совсем в течение месяца. За то же время радий самопроизвольно восстанавливает свою мощность теплового излучения и через месяц выделяет тепло с прежней скоростью, как до эксперимента.

Тепло выделяет не только эманация, но и вещество, которое оседает на стенках сосуда. Оказалось, что тепловой эффект связан с излучением α-частиц и непосредственно зависит от радиоактивности. Большая часть теплового эффекта эманации обязана непрерывной бомбардировке стенок трубки и заполняющего газа α-частицами, которые испускаются эманацией и другими образующимися из нее веществами. Если собрать кубический дюйм эманации, то выделившегося из него тепла было бы достаточно, чтобы расплавить стенки стеклянной трубки, в которую заключена эманация. Можно легко подсчитать, что при одинаковых весовых количествах эманация излучает примерно в миллион раз больше энергии, чем образуется в химических реакциях, протекающих с самым большим выделением тепла. Эманация весом в фунт немедленно после отделения способна выделять мощность примерно в 10 000 *л. с.* Мощность излучения за 4 дня уменьшится вдвое, но через месяц будет все еще заметна; суммарная энергия, выделенная этим количеством эманации, эквивалентна энергии, необходимой машине мощностью 10 000 *л. с.* для работы в течение 6 дней. Если бы было возможно когда-нибудь получить большое количество эманации и собрать ее энергию, то нескольких фунтов эманации было бы достаточно для выделения энергии, необходимой лайнеру, чтобы пересечь Атлантический океан. Если учесть, что для выделения одного фунта эманации необходимо около 50 *т* радия, то перспектива использования эманации в качестве источника энергии не кажется сейчас многообещающей.

ИЗЛУЧЕНИЕ И ЭМАНАЦИЯ РАДИЯ *

ЧАСТЬ II

Рассмотрим теперь влияние непрерывного образования радием эманации на радиоактивность. Бромид радия в сухой атмосфере выделяет в воздух очень мало эманации. Это обусловлено не замедлением образования эманации, а ее неспособностью проникать через массу радия. Эманация накапливается или окклюдируется в твердом веществе и может быть высвобождена только путем нагревания или растворения радия.

Предположим, что небольшое количество твердого бромида радия через некоторое время после приготовления нагревается с целью выделения эманации, которая затем собирается и перемешивается с воздухом в закрытом сосуде; α-активность радия сразу уменьшается и в течение четырех или пяти часов достигает минимальной величины, составляющей лишь $^1/_4$ первоначального значения. Этот медленный спад активности до минимума обусловлен затуханием возбужденной активности, образованной в массе радия накопленной в ней эманацией. Одновременно радий почти полностью теряет на время свою способность испускать β- и γ-лучи. Эта потеря радием активности кратковременна, ибо мощность излучения радия самопроизвольно снова возрастает, и после месячного интервала достигает примерно начальной величины.

Рассмотрим теперь эманацию, которая была отделена от радия нагреванием. В закрытом сосуде ее способность разряжать наэлектризованные тела в течение нескольких первых часов возрастает. Это связано с возбужденной активностью, образованной эманацией в стенках сосуда, в котором она заключена. Эманация теряет свою активность во времени в геометрической прогрессии. Активность спадает до $^1/_2$ начальной величины за 4 дня, до $^1/_4$ начальной величины — за 8 дней и т. д. Кривая спада активности эманации графически изображена на рис. 1.

По мере потери эманацией своей активности выделивший ее радий восстанавливает потерянную активность. Это связано с непрерывным образованием радием эманации, которая, как уже было указано, остается в нем; поскольку эманация сама излучает, активность радия возрастает со временем. Кривая восстановления активности, в связи с образованием свежей эманации, показана на том же рисунке. Эти две кривые — спада и восстановления — дополнительны одна к другой. Когда эманация

---

* Technics. August, 1904, 171—175.

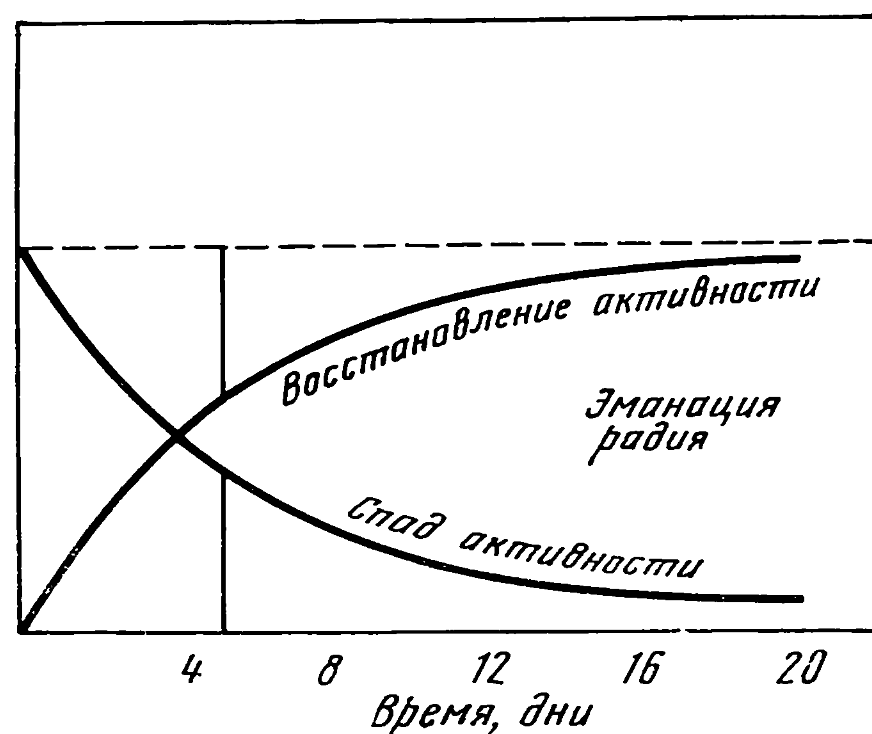


Рис. 1

теряет половину своей активности, радий самопроизвольно набирает половину своей потерянной активности. Полная сумма активности отделенной эманации вместе с активностью радия, из которого она была выделена, всегда равна начальной активности радия. Кажется, будто отделенная эманация и радий соединены каким-то неуловимым и сложным механизмом, так что любое уменьшение интенсивности излучения одного компенсируется равным по величине увеличением интенсивности другого. Эта связь, однако, становится ясной, если вспомнить, что радий всегда выделяет свежую эманацию с постоянной скоростью и что эманация постоянно теряет свою активность в результате происходящих в ней превращений. Когда эманация извлекается из радия, свежая эманация образуется и накапливается в радии. Если бы эманация не теряла со временем своей способности излучать, следовало бы ожидать, что активность радия будет во времени неуклонно увеличиваться. Но эманация всегда претерпевает превращения и теряет свою активность, поэтому должно достигаться равновесие, когда образование свежей эманации как раз компенсирует потерю активности эманацией, накопленной в радии. Подобно тому как население страны остается постоянным, если рождаемость равна смертности, так и активность радия достигает определенной постоянной величины, когда число частиц эманации, образующихся в 1 *сек*, точно равно числу частиц, теряющих за то же время способность излучения.

В этом непрерывном процессе образования нового вида вещества, излучающего только в течение ограниченного времени, лежит ключ к объяснению явления радиоактивности. Каким процессом можно объяснить его удивительное поведение, его самопроизвольное и непрекращающееся испускание α- и β-частиц, интенсивное испускание тепла и образование газа, обладающего новыми и удивительными свойствами? Очевидно, что для объяснения появления нового вида вещества необ-

ходимо протекание какого-то химического процесса. Но, с другой стороны, законы, которым подчиняется образование этого вещества, очень сильно отличаются от законов обычных химических превращений. Температура, которая так заметно влияет на обычные химические реакции, никак не воздействует на процессы, происходящие в радии. Ни активность, ни тепловой эффект не изменяются при погружении радия в жидкий воздух, и, как показывают эксперименты, скорость спада активности эманации не изменяется даже при самых жестких химических и физических воздействиях. Если, однако, предположить, что изменения происходят в самих атомах радиоактивного элемента, то тогда температура не должна оказывать большое влияние, ибо попытки химиков раздробить атом на более простые формы показывают, что значительные изменения температуры мало сказывались на стабильности химического атома.

Более года назад Содди и автор предложили теорию, согласно которой явления радиоактивности обусловлены распадом радиоатомов. Эта теория просто объясняет все сложные явления, происходящие с радиоактивными телами, и соединяет воедино ряд кажущихся не связанными между собой фактов.

Давайте для краткости рассмотрим применение этой теории к объяснению свойств одного атома. Предполагается, что очень малое количество атомов радия (достаточно одного атома на сто тысяч миллионов) становится нестабильным каждую секунду и распадается с быстротой взрыва. При этом часть атома — α-частица — вылетает с огромной скоростью. Испускание частицы, которая имеет массу, равную двум массам атома водорода, делает атом радия более легким, чем ранее, и должно изменить

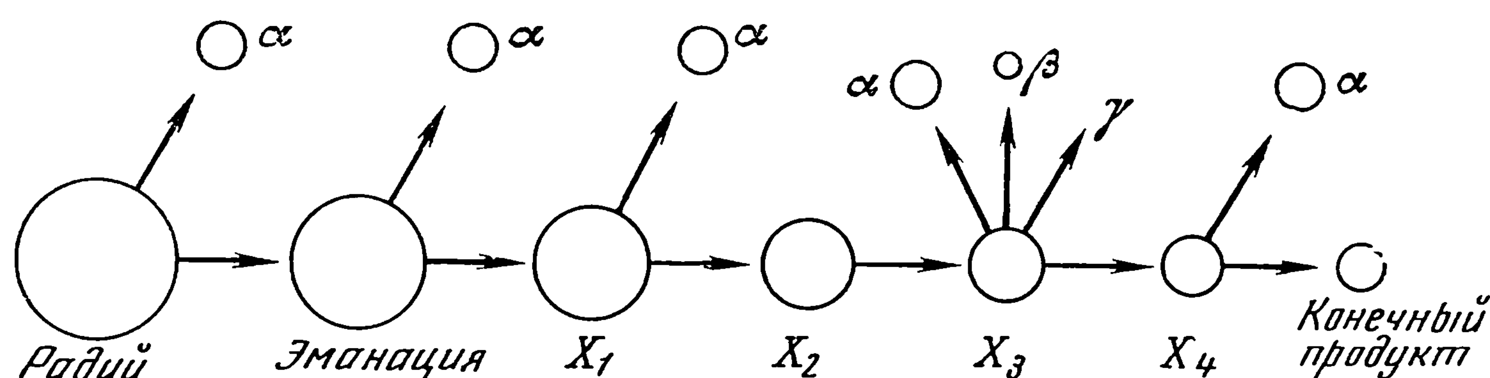


Рис. 2

его химические и физические свойства. По этой теории атом радия минус вылетевшая частица образует атом «эманации радия». Атом эманации также нестабилен; в среднем половина полного числа образованных атомов распадается в течение 4 дней, причем каждый атом при распаде испускает другую α-частицу. В результате эманация презращается в другой вид материи — эманацию X, как она была названа, которая ведет себя как твердое тело. Это тело, в свою очередь, нестабильно, и процесс распада продолжается этап за этапом до тех пор, пока на пятой стадии кроме α-частицы не испускаются β-частица и γ-лучи.

Различные вещества, образующиеся при распаде атома радия, и тип испускаемых на каждом этапе излучений показаны на рис. 2.

В результате распада атома радия образуются по крайней мере пять различных веществ. Эманация представляет собой химически инертный газ, а последующие продукты ведут себя как металлические вещества, которые легко растворяются в некоторых кислотах и испаряются при нагревании. Каждое из этих веществ отличается от обычного химического элемента тем, что оно стабильно и непрерывно и быстро переходит в другой вид вещества. Продукты распада атома радия можно, таким образом, рассматривать как переходные элементы с очень ограниченным временем жизни. Каждый продукт преобразуется по определенному закону и с совершенно определенной скоростью. Через любой интервал времени t число атомов N любого данного вида вещества, которые не подверглись распаду, дается точным выражением

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 — начальное число атомов; λ — постоянная распада; e — основание натуральных логарифмов. В таблице приведено время T, за которое данное количество каждого переходного элемента уменьшается вдвое.

Вещество	T	Примечание
Радий		
↓		
Эманация	4 дня	1-й продукт
↓		
Эманация X (первое превращение)	3 *мин*	2-й »
↓		
Эманация X (второе превращение)	21 »	3-й »
↓		
Эманация X (третье превращение)	28 »	4-й »
↓		
Эманация X (четвертое превращение)	Очень большое	5-й »
↓		
Конечный продукт		

Распад каждого продукта радия, за исключением третьего, сопровождается испусканием с огромной скоростью одних только α-частиц (см. рис. 2). Примечательно, что β- и γ-лучи испускаются лишь при распаде четвертого продукта, т. е. при последнем *быстром* превращении, которое имеет место в атоме радия.

Пятый продукт радия отличается от других чрезвычайно медленной скоростью распада. Полученные до сих пор результаты указывают на то, что для распада половины количества этого вещества потребуется, по-

видимому, несколько сот лет. Поскольку это вещество непрерывно образуется радием и распадается очень медленно, то оно должно постоянно накапливаться в некоторых количествах в веществе, содержащем радий. Сейчас имеется достаточно подтверждений того, что радиоактивное вещество, выделенное из урановой руды Марквальдом и названное им *радиотеллуром*, на самом деле пятый продукт распада атома радия.

Продукты радия нестабильны и быстро распадаются, и мы не можем считать их идентичными какому-либо виду стабильного вещества.

Обнаружено, что каждый радиоактивный продукт обладает характерными химическими и физическими свойствами, которые позволяют отличать его не только от предшествующего и последующего продуктов, но и от материнского элемента. Эманация представляет собой тяжелый газ, который может быть сконденсирован при очень низкой температуре; как и газы гелиево-аргонной группы, он химически инертен. С другой стороны, твердые продукты, образующиеся из эманации, растворимы в некоторых кислотах; они испаряются при высоких температурах и могут быть частично отделены друг от друга с использованием различий в летучести или электролизом.

За исключением эманации, никакой из продуктов радия не может быть собран в достаточном количестве для исследования прямыми химическими методами. Количество каждого продукта, которое может быть получено из данного количества радия, зависит от скорости его распада. По достижении состояния радиоактивного равновесия число атомов любого продукта, образующихся в единицу времени, должно быть равно числу исчезающих атомов. Но поскольку продукты распадаются с разными скоростями, то число атомов должно быть больше в случае более медленно распадающегося продукта. Можно рассчитать, что вес эманации (половина которого распадается за 4 дня), полученной из 1 *г* бромида радия, составляет около $^{1}/_{100}$ *мг*, тогда как вес четвертого продукта (половина которого распадается за 28 *мин*) составляет около $^{3}/_{100\,000}$ *мг* — количество, слишком малое, чтобы его можно было измерить на химических весах. Таким образом, оказывается, что радиоактивные продукты, образующиеся при распаде атомов радия, вследствие ограниченного времени их жизни, никогда не могут быть собраны в больших количествах. Однако количество неактивных продуктов должно возрастать до тех пор, пока имеется радий, и мы можем надеяться обнаружить их в радиевых рудах в измеримых количествах. Неактивными продуктами радия являются испущенные α-частицы и конечный продукт.

Минерал уранит, в котором встречается радий, содержит в небольших количествах бóльшую часть известных элементов. Особого внимания заслуживает наличие редкого газа гелия. Как обнаружено, с радиоактивными минералами связан только гелий, и его присутствие в них всегда вызывало удивление. В 1902 г. Содди и автор предположили, что гелий, возможно, есть продукт распада радиоактивных элементов. Эта гипотеза получила сильную поддержку проведенными измерениями массы испус-

каемых радием α-частиц, так как в пределах экспериментальных ошибок оказалось, что частицы имеют ту же массу, что и атом гелия.

Это предположение было недавно великолепно проверено в экспериментах Вильяма Рамзая и Содди. Они обнаружили, что гелий всегда появляется в закрытых сосудах, в которых в течение некоторого времени находилась эманация радия. Этот результат указывает на то, что гелий образуется из эманации по мере ее постепенного распада и исчезновения. Существовало мнение, что гелий есть конечный продукт распада атома эманации, но полученные результаты скорее указывают на то, что гелий на самом деле есть испущенная α-частица. Если это так, то гелий должен образовываться из каждого продукта радия, испускающего α-лучи. Однако экспериментальные трудности в проведении такого исследования столь велики, что прогресс неизбежно будет очень медленным.

Образование гелия эманацией радия имеет первостепенное значение, так как это первый достоверный случай превращения одного элемента в другой. Этот процесс превращения имеет очень специфический характер, ибо он происходит спонтанно и со скоростью, не поддающейся нашему контролю. Чтобы объяснить образование гелия из радия чисто химическим путем, предполагалось, что гелий не истинный элемент, а в действительности представляет собой нестабильное соединение гелия с каким-то другим известным или неизвестным элементом и что это соединение постоянно распадается с освобождением гелия. Однако необходимо учитывать, что такое постулированное соединение должно носить совершенно уникальный характер, ибо необходимо предположить, что в отличие от любого другого молекулярного соединения оно распадается с испусканием заряженных частиц, движущихся с огромными скоростями, и что энергия, высвобождаемая при этих превращениях, примерно в 1 000 000 раз больше энергии, выделяемой в самой экзотермичной химической реакции. Необходимо также предположить, что на процесс освобождения гелия совершенно не влияют значительные изменения температуры — результат, который ранее никогда не наблюдался ни в какой химической реакции.

Насколько показывают проведенные эксперименты, радий — истинный элемент в обычно принятом химическом смысле. Он имеет определенный спектр и атомный вес, и химическое поведение его близко к хорошо известному элементу барию. Согласно теории распада, гелий и радиоактивные продукты появляются вследствие распада атома радия. Различие в двух точках зрения в основном ограничивается лишь терминологией. Химический атом определяется как наименьшая химическая единица, которая входит в соединение с другими веществами и не может быть разделена воздействием имеющихся физических и химических средств. Насколько нам известно, это определение справедливо и в случае радия, ибо распад происходит спонтанно и не может быть ускорен или замедлен посредством физических или химических воздействий.

Принимая во внимание новый характер превращений, происходящих в радии, и огромное излучение энергии, по-видимому, более разумно

предположить, что эти превращения результат совершенно нового вида превращений вещества — распада химического атома, а не молекулы.

Поскольку радий непрерывно распадается с испусканием α-частиц и образованием новых видов вещества, то данное количество радия должно с течением времени исчезнуть как таковое и превратиться в неактивные вещества. Можно рассчитать, что в 1 *г* бромида радия за год преобразуется около 0,5 *мг*. Примерно за 1500 лет половина имеющегося радия распадалась. Если бы весь мир первоначально состоял из чистого радия, то через 30 000 лет его осталось бы не более одной миллионной части, т. е. примерно то количество, которое наблюдается сегодня в хороших образцах урановой смолки. Но поскольку есть веские основания считать, что возраст земной коры много больше, то мы вынуждены прийти к заключению, что радий должен каким-то образом непрерывно образовываться из материалов Земли. В качестве возможных родителей радия можно предположить элементы уран и торий, так как оба обладают необходимым для этого, бóльшим, чем у радия, атомным весом и оба всегда обнаруживаются в минералах, из которых извлекается радий. Кроме того, оба эти элемента обладают намного большим, чем радий, временем жизни. Так как активность урана и тория в 1 млн. раз меньше активности радия, их время жизни должно быть, примерно, в 1 млн. раз больше, т. е. потребуется больше 1 500 млн. лет, чтобы уран распался вдвое. По некоторым соображениям уран кажется наиболее вероятным родителем радия, ибо найдено, что минералы, богатые ураном, содержат много радия, тогда как минералы, богатые торием, часто содержат мало радия. Будущие исследования должны дать однозначный ответ на этот вопрос. Если радий образуется из урана, то по отношению к урану он занимает такое же положение, как эманация радия по отношению к радию, с той лишь разницей, что продолжительность жизни радия много больше, чем его эманации. По истечении нескольких тысяч лет количество радия, присутствующего в минералах, должно достигнуть постоянной величины, когда образование радия компенсируется его исчезновением вследствие распада. Количество присутствующего в минералах радия должно, с этой точки зрения, всегда быть пропорционально количеству материнского элемента.

Большое внимание недавно было обращено на распределение радиоактивного вещества в земной коре и атмосфере. Его присутствие и количество были определены по скорости разряда электроскопа — методом, превосходящим по точности даже спектральный анализ.

Эксперименты Эльстера и Гейтеля, Дж. Дж. Томсона, Стрэтта и др. показали, что радиоактивное вещество, которое пока обнаружено в наибольших количествах в урановой смолке, широко распространено в природе. Радиоактивная эманация находится повсюду в атмосфере, в подземных водах, в горячих источниках и в поверхностной воде. Эльстер и Гейтель нашли, что земная кора вся более или менее радиоактивна. Если воздух засасывать насосом, расположенным на обычной садовой земле, то оказывается, что он насыщен эманацией. Количество радиоактив-

ного вещества различно в разных местах, но больше всего заметно в глине и иле, полученном из горячих источников. Наличие радиоактивности служит указанием на то, что вещество распадается с колоссальным выделением энергии, и естественно задаться вопросом, какую роль радиоактивные вещества играют в космической физике.

Основываясь на предположении, что Земля была первоначально расплавленной массой, Кельвин оценил, что для остывания Земли до ее современного состояния требуется от 20 млн. до 1 млрд. лет. Эти расчеты устанавливают определенный максимальный предел времени, которое должно было пройти, прежде чем Земля стала достаточно холодной, чтобы на ней возникла жизнь. В «Natural Philosophy» Томсона и Тэйта, в приложении E, после дискуссии о вероятном возрасте Солнца и Земли имеется следующая фраза: «Что касается будущего, то можно сказать с равной определенностью, что жители Земли не смогут продолжать наслаждаться необходимым для их жизни светом и теплом еще многие миллионы лет, разве что в величайшей сокровищнице мироздания приготовлены пока нам неизвестные источники энергии».

В свете открытия радия и других радиоактивных веществ, которые при своих превращениях способны испускать огромное количество энергии, это замечание кажется почти пророческим. Предположив, что взятые Кельвином средний температурный градиент ($^1/_{50}$° по Фаренгейту на фут, отсчитывая от поверхности Земли) и проводимость скал и почвы, можно рассчитать, что количество тепла, подводимого к поверхности Земли ежегодно и теряемое на излучение, может быть обеспечено присутствием очень малого количества радия (или эквивалентного количества другого радиоактивного вещества), составляющего всего около пяти частей на десять тысяч миллионов по весу. Наблюдения Эльстера и Гейтеля показывают, что количество присутствующего в Земле радиоактивного вещества — величина именно такого порядка. Таким образом, вполне возможно, что наблюдаемый в Земле температурный градиент может быть отнесен за счет тепла, высвобождаемого распределенным в ней радиоактивным веществом. Если это так, то существующий температурный градиент может быть в достаточной мере постоянным в течение длительного периода времени и вычисления Кельвина могут служить лишь минимальным пределом возраста нашей планеты. Таким образом, та температура, которая необходима на Земле, чтобы продолжалась животная и растительная жизнь, может поддерживаться гораздо дольше, нежели это определил Кельвин, исходя из тепловых данных. Подобные рассуждения применимы и к вопросу о солнечном тепле, ибо наличие на Солнце радия в количестве, равном примерно четырем миллионным частям по весу, объяснило бы существующую интенсивность излучения тепла. Таким образом, открытие радиоактивных элементов, которые при своем распаде выделяют огромное количество энергии, увеличивает возможный предел длительности жизни на нашей планете, и это может объяснить время, которое, по мнению геологов и биологов требуется для процесса эволюции.

МЕДЛЕННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРОДУКТОВ РАДИЯ *

Ранее было показано [1], что распад радия проходит через ряд четко выраженных стадий. Сначала радий превращается в эманацию радия, которая в свою очередь превращается в активный осадок, который ведет себя как твердое тело и дает начало явлениям возбужденной активности. Я недавно показал, что этот активный осадок подвергается трем дальнейшим быстрым превращениям [2]. Для удобства продукты в активном осадке будут называться радием А, радием В и радием С соответственно [1]. Превращение А в В сопровождается только излучением α-частиц, переход В в С является безлучевым, тогда как при переходе С в D испускаются α-, β- и γ-лучи. Время T, за которое половина каждого из продуктов радия испытывает превращение, приведено в табл. 1.

Однако превращения радия на этой стадии не оканчиваются, а, как будет показано, имеются весомые доказательства в пользу существования еще по крайней мере двух более медленных превращений.

Супруги Кюри [3] обнаружили, что тело, помещенное в эманацию радия, после удаления не теряет полностью свою активность. Остаточная активность всегда имеется и по их оценкам составляет примерно $^1/_{20\,000}$ начальной активности. Как будет показано дальше, величина этой остаточной активности зависит не только от количества эманации, в которой выдерживалось тело, но и от времени экспозиции. Через несколько часов остаточная активность составляет меньше одной миллионной доли активности, получающейся сразу же после удаления эманации. По наблюдениям Гизеля [4], платиновая проволока после экспозиции в эманации приобретала остаточную активность, которая, как он утверждает, состоит лишь из α-лучей.

Приведем описание некоторых исследований, выполненных автором данной работы по выяснению природы этой остаточной активности и химическим свойствам самого активного вещества. Прежде всего необходимо показать, что остаточная активность есть следствие осадка радиоактивного вещества, а не некоторого воздействия интенсивного излучения, которому подверглось ставшее активным тело.

---

* Philosophical Magazine, ser. 6, 1904, 8, November, 636—650.

[1] Термин «эманация X», который я раньше применял для обозначения радия А, не очень удобен, и я отказался от него в пользу более простого обозначения.

Внутрь длинной стеклянной трубки были помещены равные по площади тонкие металлические пластинки из алюминия, железа, меди, серебра, свинца и платины. В трубку вводилось большое количество эманации радия, после чего она закрывалась. Через 7 дней металлические пластинки извлекались и после двухдневной выдержки, во время которой исчезала обычная возбужденная активность.с помощью электрометра измерялась их активность. Было найдено, что активности пластинок неодинаковы; наибольшая активность была у меди и серебра, а наименьшая — у алюминия, причем активность меди была вдвое больше активности алюминия. Еще через неделю были снова измерены активности пластинок. За это время активность каждой пластинки уменьшилась, но первоначально обнаруженные различия почти исчезли. После достижения минимальной величины активность каждой пластинки медленно, но неуклонно с той же скоростью стала возрастать. Через месяц активности каждой из пластинок были почти прежними и втрое превосходили минимальную величину. Первоначальные расхождения в кривых спада активности различных металлов, по всей вероятности, связаны с небольшой разницей в степени поглощения эманации радия металлическими пластинками, причем наибольшее поглощение отмечено у меди и серебра, а наименьшее — у алюминия. По мере того как окклюдированная эманация выделялась или теряла свою активность, активность металла падала до своего граничного значения. Поглощение эманации радия свинцом, парафином и каучуком недавно наблюдали Кюри и Данн [5].

Таблица 1

Продукт		T	Лучи
Радий		—	α-лучи
↓			
Эманация радия		4 дня	α-лучи
↓			
Радий A	Активный осадок	3 *мин*	α-лучи
↓			
Радий B		21 »	Нет лучей
↓			
Радий C		28 »	α-, β-, γ-лучи

Остаточная активность пластинок состояла из α- и β-лучей, которые присутствовали во всех случаях в довольно необычных пропорциях. Величина активности и идентичность излучения, испускаемого каждой пластинкой, показывают, что остаточная активность обусловлена изменением некоторого вещества, осевшего на пластинках. Эта активность не может быть приписана воздействию интенсивного излучения, так как в этом случае следовало бы ожидать, что активности, образованные в различных пластинках, различались бы не только количественно, но и ка-

чественно. Этот результат подтверждается тем, что активное вещество может быть удалено с платиновой пластинки серной кислотой и имеет другие, отличные от платины химические и физические свойства.

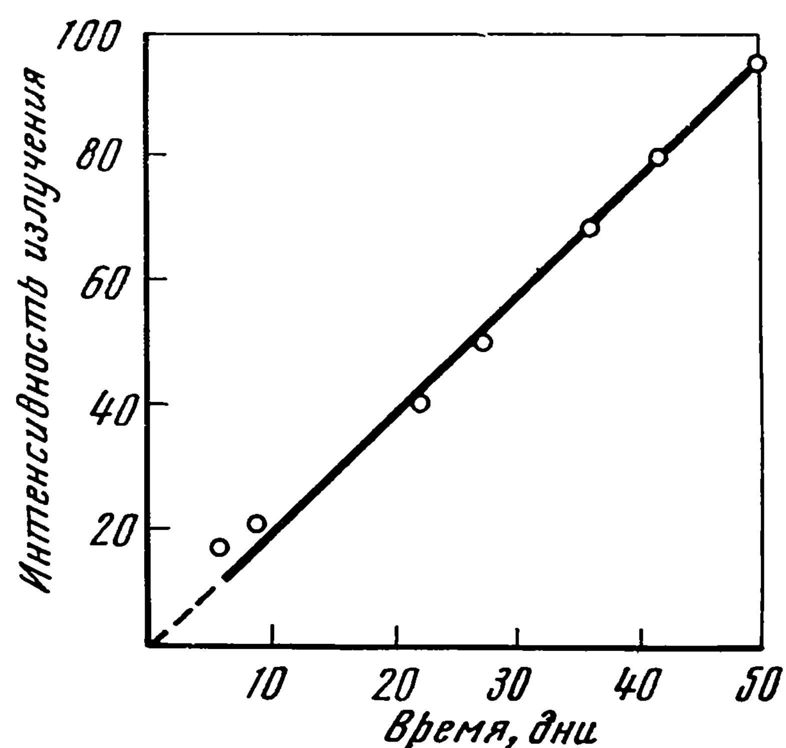


Рис. 1

Рассмотрим вначале изменение остаточной активности во времени. Платиновая пластинка выдерживалась в эманации радия в течение 7 дней. Количество эманации, использовавшейся в опытах, было примерно равно тому количеству, которое может быть получено из 3 *мг* чистого бромида радия. Сразу же после извлечения из эманации ток насыщения, обусловленный излучением из пластинки, был равен $1{,}5 \cdot 10^{-7}$ *а*. Ток измерялся между двумя параллельными пластинами с помощью гальванометра. Через несколько часов после извлечения активность убывала в соответствии с экспоненциальным законом вдвое за 28 *мин*. Через 3 дня после извлечения активная пластинка давала измеренный электрометром ток насыщения $5 \cdot 10^{-13}$ *а*, т. е. $^1/_{300000}$ начальной активности. Было замечено, что активность неуклонно возрастала со временем. Результаты показаны на рис. 1, где время отсчитывается от середины времени экспозиции в эманации. Кривая представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат. Активность возрастала равномерно в течение 2 месяцев, пока проводились измерения.

Некоторые результаты говорят о том, что это непрерывное возрастание со временем продолжается по крайней мере 9 месяцев. Эманация, выделенная 30 *мг* бромида радия, была сконденсирована в стеклянной трубке, которая затем была запаяна. Через месяц трубка была открыта и в нее была введена разбавленная серная кислота. Кислота растворила активный осадок, осевший в трубке. Выделение радиоактивного осадка производилось путем нагревания серной кислоты. Первое определение активности этого осадка было сделано через 6 недель после введения эманации. Через 8 месяцев активность примерно в 7 раз превосходила начальную величину. Результат не был достаточно точным, так как часть активности время от времени извлекалась висмутовым стержнем, помещенным в раствор активного вещества. Тем не менее результат этот указывает на то, что активность неуклонно возрастала на протяжении 9 месяцев.

Излучения, испускаемые активным веществом

Остаточная активность состоит из α- и β-лучей, причем вначале β-лучи составляют необыкновенно большую часть. Отношение числа α-лучей к числу β-лучей, испускаемых платиновой пластинкой через месяц после ее извлечения из эманации, составляло не более $^1/_{50}$ этого отношения для случая тонкой пленки бромида радия в радиоактивном равновесии. В отличие от α-активности, активность, измеренная по β-лучам, оставалась постоянной и, следовательно, отношение числа α-лучей к числу β-лучей неуклонно возрастало со временем. Эксперименты показали, что в течение 9 месяцев интенсивность β-излучения если и изменяется, то очень мало. Отсутствие пропорциональности между α- и β-лучами показывает, что эти два вида лучей испускаются различными продуктами. Этот вывод подтверждается экспериментами, которые будут описаны ниже и которые показывают, что продукты, испускающие α- и β-лучи, могут быть отделены один от другого физическими и химическими методами.

Влияние температуры на активность

Активная платиновая пластинка выдерживалась при различных температурах в электрической печи, а измерение активности после выдержки проводилось при температуре атмосферы. Выдержка в печи в течение 4 *мин* вначале при 430° С, а потом при 800° С весьма мало влияла на активность, если вообще влияла. После нагрева в течение 4 *мин* при 1000° С активность упала на 20%, а при дальнейшей выдержке в течение 8 *мин* при температуре около 1050° С α-активность почти полностью исчезла, а β-активность под воздействием высокой температуры заметно не изменилась. Дальнейшее нагревание до существенно более высокой температуры, приводящее к уменьшению активности, измеренной по β-лучам, показывает, что продукт, испускающий β-лучи, тоже летуч. Эти результаты показывают, что активное вещество состоит из двух частей. Часть, испускающая β-лучи, нелетуча при 1000° С, другая часть, испускающая α-лучи, почти полностью возгоняется при этой температуре.

Разделение компонент с помощью висмутовой пластинки

Медленно распадающееся активное вещество было получено в растворе путем введения разбавленной серной кислоты в стеклянную трубку, в которой целый месяц находилась эманация, выделенная из 30 *мг* бромида радия. Раствор обладал большой активностью и испускал как α-, так и β-лучи, причем последние, как и в других случаях, составляли необычайно большую часть.

Полированный висмутовый диск, опущенный на несколько часов в раствор, становился сильно активным. Активное вещество, осевшее на висмуте, испускало α-лучи, следов β-лучей не обнаружено. После того

как несколько висмутовых дисков были последовательно погружены в раствор, активное вещество, испускающее α-лучи, было почти полностью извлечено. Это проверялось путем выпаривания раствора после такой процедуры; β-активность осталась неизменной, а α-активность составляла лишь 10% первоначальной величины. Активное вещество, осажденное на висмуте, не изменило заметно своей активности в течение месяца, а некоторые наблюдения приводят к выводу, что больших изменений не происходит и через 5 месяцев. Наблюдения в последнем случае были, однако, недостаточно точными, чтобы быть уверенным, что в течение этого времени не было небольшого изменения процентного отношения. Сейчас проводятся эксперименты по исследованию с большей точностью активности висмутовой пластинки во времени. Мы надеемся, что измерения, проведенные в течение следующего года, помогут определить скорость распада этого продукта, если только ее значение окажется достаточным, чтобы быть измеренным за годовой интервал. Полученные таким способом результаты находятся в согласии с результатами, полученными из экспериментов по нагреванию радиоактивного осадка до высокой температуры. Активный осадок состоит из двух сортов вещества:

1) продукта, испускающего только β-лучи, растворимого в серной кислоте, но не возгоняемого при 1000° С и не осаждаемого на висмуте;

2) продукта, испускающего только α-лучи, растворимого в серной кислоте, возгоняемого при 1000° С и осаждаемого из раствора на висмуте.

Объяснение результатов

Мы видели, что α-активность *возрастает*, если присутствует продукт, испускающий β-лучи, но остается постоянной или меняется очень медленно, если испускающий α-лучи продукт отделен от испускающего β-лучи продукта с помощью висмутовой пластинки. Независимо от того, присутствует ли продукт, испускающий α-лучи, или нет, β-активность остается постоянной. Этот результат показывает, что продукт, испускающий β-лучи, является материнским по отношению к продукту, испускающему α-лучи. Величина остаточной активности из эманации радия зависит от количества эманации и времени экспозиции в эманации. Эти результаты показывают, что медленно распадающийся активный осадок есть продукт эманации, состоящий из нескольких частей, и, поскольку первые три переходные продукты эманации — радий A, радий B и радий C были тщательно исследованы и было показано, что это последовательные продукты распада, то естественно предположить, что медленно превращающееся вещество есть продукт последнего быстро превращающегося продукта радия C.

Следуя предложенной терминологии, радий C образует продукт, испускающий β-лучи, который должен быть назван радием D, а радий D превращается в продукт, испускающий α-лучи, и мы будем его называть

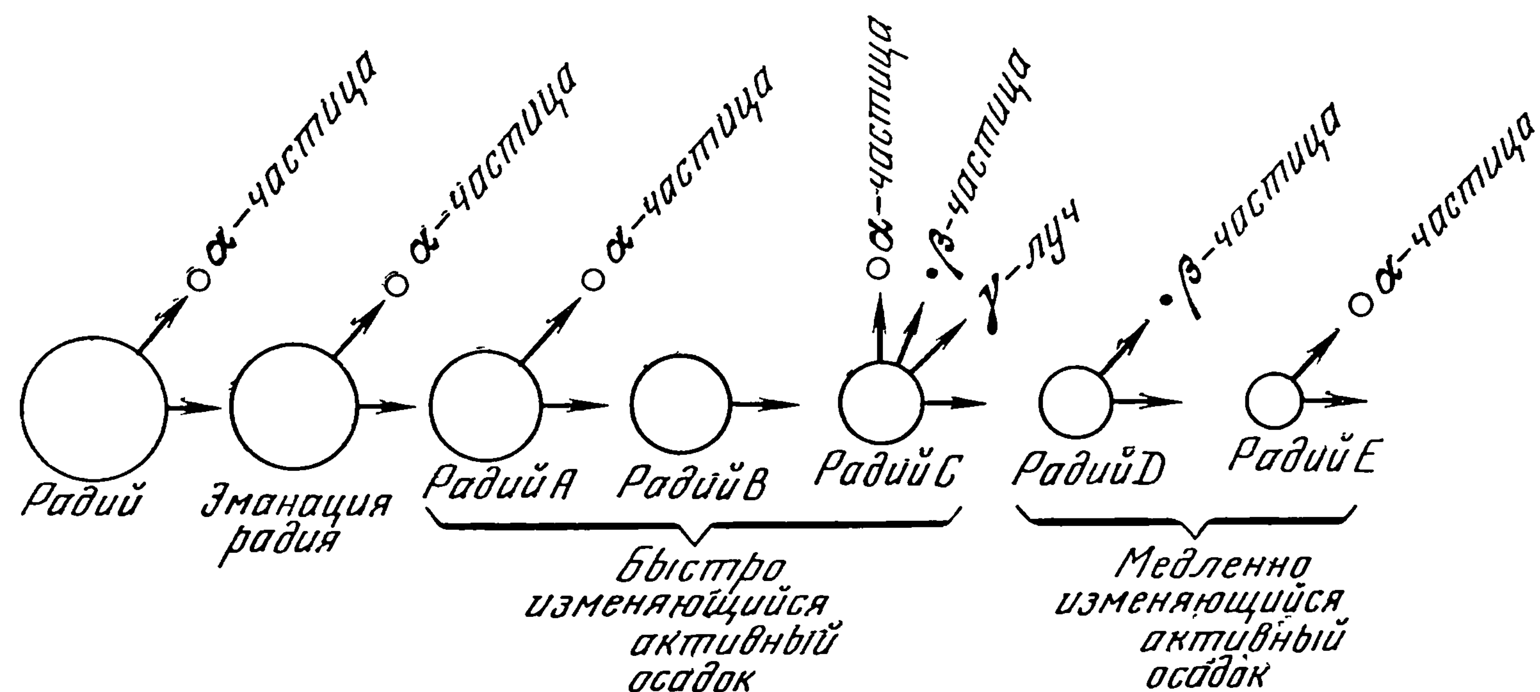


Рис. 2

радием E. Продукт радий D испускает только β-лучи. Переходные продукты превращения радия показаны на рис. 2.

Никаких дальнейших превращений до сих пор не обнаружено. Исследовалось наличие эманации в активном растворе радия D и радия E. Следы эманации радия наблюдались всегда, но это, вероятно, обусловлено небольшими следами радия, заносимыми в сосуд, в котором находилась эманация. Этот вопрос, однако, продолжает изучаться.

Теория двух последовательных превращений

Во всех случаях исследованных радиоактивных превращений количество нераспавшегося вещества N_t в любой момент времени t определяется выражением

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t},$$

где N_0 — первоначальное количество; λ — постоянная распада. Дифференцируя, получим

$$\frac{dN_t}{dt} = -\lambda N_t,$$

или интенсивность превращения всегда пропорциональна количеству нераспавшегося вещества.

Предположим, что P_0 частиц продукта радия D осела за время выдержки в эманации. Предполагается, что это время настолько мало, что превращения радия D во время выдержки в эманации очень малы.

Пусть P — число частиц в веществе радия D в любой момент времени; Q — число частиц радия E в любой момент времени; λ_1 — постоянная распада радия D; λ_2 — постоянная распада радия E.

Тогда

$$P = P_0 e^{-\lambda_1 t}.$$

Когда вещество D превращается в E, величина Q сначала возрастает. Прирост dQ за время dt определяется разницей между числом частиц E ($\lambda_1 P$), образовавшихся при превращении D в E и числом E ($\lambda_2 Q$), которое превращается в F.

Тогда

$$dQ = \lambda_1 P dt - \lambda_2 Q dt$$

и

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda_1 P_0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 Q.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$Q = ae^{-\lambda_1 t} + be^{-\lambda_2 t}.$$

Поскольку $Q = 0$ при $t = 0$, то

$$a = -b = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} P_0$$

и

$$Q = \frac{\lambda_1 P_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}).$$

Для малых значений t

$$Q = \lambda_1 P_0 t,$$

т. е. величина Q растет пропорционально времени. Величина Q проходит через максимум при времени T, которое определяется выражением

$$e^{(\lambda_1 - \lambda_2) T} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1},$$

и затем уменьшается во времени.

Начальное увеличение α-активности во времени находится, таким образом, в согласии с тем выводом, что радий E, который испускает только α-лучи, образуется из радия D. Времени наблюдений (2 месяца) оказалось недостаточно для получения всей кривой α-активности, поэтому была получена только начальная часть этой кривой. Результаты, однако, показывают, что время превращения наполовину продуктов D или E намного больше двух месяцев.

Хотя время наблюдений было слишком малым, чтобы определить экспериментально величину λ_1 или λ_2, при некоторых предположениях все же можно сделать грубые оценки этих величин.

Экспериментально обнаружено, что каждый продукт радия, который испускает α-лучи, вносит примерно одинаковый вклад в α-активность радия, когда он находится в радиоактивном равновесии. Поскольку при равновесии в 1 *сек* должно распадаться одинаковое число частиц каждого последовательного продукта, то это есть следствие того, что каждый атом каждого продукта распадается с испусканием равного числа (вероятно

одной) α-частиц. Итак, радий D непосредственно получается из радия C, и поскольку скорость превращения радия D очень мала по сравнению со скоростью превращения C, то число частиц радия D в начальный момент времени должно быть очень близко к числу частиц радия C, которые распадаются в течение того времени, когда образуется радий D. Далее предположим, что каждый атом радия C и D испускает одну β-частицу с одинаковыми скоростями. Ионизация, производимая каждой частицей в одинаковых экспериментальных условиях, будет одинаковой и, суммарная величина тока насыщения, обусловленная β-частицами в течение всего времени, когда тело подвергается действию радия C, должна быть равна соответствующей суммарной величине для β-частиц за время жизни радия D. Предположим, например, что некоторое количество эманации введено в стеклянную трубку и находится там в течение месяца. За этот период почти вся эманация претерпевает превращение. Активность, обусловленная β-частицами, испущенными эманацией, достигнет максимума через несколько часов после введения эманации, а затем будет спадать, уменьшаясь вдвое через 4 дня. Пусть i_1 — максимальный ток насыщения, вызванный β-лучами и измеренный в соответствующем измерительном объеме. Полное количество Q_1 электричества, прошедшее между пластинами измерительного объема за время жизни эманации, приближенно определяется выражением

$$Q_1 = \int_0^\infty i dt = \int_0^\infty i_1 e^{-\lambda t} dt = \frac{i_1}{\lambda},$$

где λ — постоянная распада эманации.

Точно так же, если i_2 — начальный ток, вызванный β-лучами, испущенными радием D, осажденным в трубке (измерен в одинаковых экспериментальных условиях), то соответствующая величина $Q_2 = i_2/\lambda_1$, где λ_1 — постоянная превращения радия D.

Так как по предположению

$$Q_1 = Q_2,$$

то

$$\frac{\lambda_1}{\lambda} = \frac{i_2}{i_1}.$$

Отношение i_2/i_1 определяется экспериментально, а поскольку λ для эманации известна, то определяется λ_1.

Здесь нет необходимости приводить подробности эксперимента по измерению отношения i_2/i_1. При изложенных выше предположениях было вычислено, что половина вещества радия D претерпевает превращение за 40 лет. Аналогично полное число α-лучей, испущенных радием C за время осаждения радия D, должно быть равно числу α-частиц, испущенных радием E за время его жизни, если предположить, что существует лишь одно-единственное превращение, в результате которого образуются

α-лучи. Допустим, что α-активность, обнаруженная в активном осадке, полученном 10 месяцев назад, распадается с этого времени по экспоненциальному закону; тогда можно рассчитать, что период превращения не может быть больше 80 лет. Если период изменения α-активности короче, чем для β-активности, то в конце концов α-активность будет распадаться с той же скоростью, что и β-активность. Эти два расчета окажутся согласованными в том случае, если предположить, что α-активность возрастает вдвое по сравнению с величиной, измеренной через 10 месяцев, а затем спадет во времени в соответствии с периодом превращения β-активности. Тогда период превращения α-активности соответствовал бы примерно одному году. С этой точки зрения, когда α-активность достигает своего максимального значения, то отношение α/β будет то же, что и для продукта радий С. Однако здесь имеется некоторое расхождение с данными эксперимента, так как осадок 10-месячной давности имеет примерно то же отношение, что и радий С, тогда как по приведенному выше расчету отношение α/β должно быть вдвое меньше этой величины. Эта разница, возможно, обусловлена радием Е, испытывающим дальнейшее превращение с испусканием α-лучей, которые до сих пор не были обнаружены. В этих расчетах допускалось, что α- и β-частицы, возникающие в этих медленных превращениях, производят ту же ионизацию, что и соответствующие частицы, испущенные радием С. Однако нет никакого сомнения, что это предположение на практике не реализуется. Испущенные радием D β-лучи обладают несколько меньшей проникающей способностью, чем β-лучи, испущенные радием С, тогда как проникающая способность α-лучей радия Е вдвое меньше α-лучей радия С. Наши знания механизма поглощения в веществе, однако, слишком несовершенны, чтобы с уверенностью внести поправки на эти различия.

Таблица 2

Переходные продукты радия	*T*
Радий	Около 1000 лет
↓	
Эманация	4 дня
↓	
Радий А	3 *мин*
↓	
Радий В	21 »
↓	
Радий С	28 »
↓	
Радий D	Около 40 лет
↓	
Радий Е	Около 1 года

Описанные выше методы расчета, несмотря на некоторую сложность, несомненно могут дать правильный порядок величины периодов двух превращений. Мы покажем также, что расчетные периоды приблизительно соответствуют тем количествам радия D и E, которые присутствуют в старых образцах радия. Основная неопределенность в методах расчета лежит в трудности выяснения относительного электрического эффекта, производимого α- и β-лучами, по сравнению с аналогичным эффектом, производимым этими лучами, испущенными радием С.

Время T, требуемое для превращения наполовину каждого переходного продукта радия, приведено в табл. 2.

Эксперименты со старым радием

Поскольку вещество радий D образуется из радия с постоянной скоростью, то его количество в радии будет возрастать по мере увеличения возраста последнего. В моем распоряжении было небольшое количество моего первого загрязненного образца хлорида радия, любезно предоставленного мне профессорами Эльстером и Гейтелем 4 года назад. Количество радия D, присутствующего в нем, было исследовано следующим образом: вещество растворялось в воде, которая 6 *час* непрерывно поддерживалась в состоянии кипения. При этих условиях эманация извлекается по мере ее образования, и β-лучи, испущенные радием, обусловленные продуктом радием С, практически исчезают. Заново приготовленный образец бромида радия при этих условиях сохраняет лишь 1% первоначального β-излучения. Старый радий, однако (немедленно после этой обработки), обнаруживает β-активность, составляющую примерно 8% первоначальной величины. Активность не могла быть снижена еще больше дальнейшим кипячением или пропусканием воздуха через раствор. Эта остаточная β-активность была обусловлена продуктом радий D, накопленным в радии. Она не могла быть связана с β-лучами, испущенными радием С, так как два сорта β-частиц обладали заметным различием в проникающей способности. Обусловленная радием D β-активность составляла, таким образом, около 9% от β-активности радия С. Если пренебречь разницей в поглощении β-лучей, то в том случае, когда активность продукта радия D в радии достигает максимальной величины, β-активность, обусловленная радием D, должна быть такой же, как активность радия С. Поскольку полураспад радия D происходит за 40 лет, его количество в радии через 4 года составляло бы около 7% максимального, т. е. его β-активность составляла бы примерно 7% активности радия С. Измеренная и расчетная величины (7 и 9% соответственно) — величины одного порядка. Количество β-лучей, испущенных радием D, присутствующим в чистом бромиде радия возрастом около года, составляло около 2% полного количества.

Количество радия E, присутствующего в старом радии, определялось с помощью измерения активности висмутового диска, опущенного на несколько дней в раствор. Радий E не осаждается в заметном количестве на вис-

муте из водного раствора бромида радия. Однако, если к раствору добавить небольшое количество серной кислоты, радий E быстро осаждается на висмуте. Добавление серной кислоты к раствору радия практически обеспечивало отделение радия D и радия E от собственно радия, ибо последний осаждался в виде сульфата, а продукты D и E оставались в растворе. После фильтрации раствор содержал большую часть продуктов D и E и очень мало радия.

Оказалось, что отношение α/β для старого радия отличается в 2 раза от отношения, найденного для радия C. Этот результат хорошо согласуется с выводом, сделанным в расчетах периодов превращений, так как теоретически может быть показано, что количества D и E в радии продолжают оставаться пропорциональными один другому через 5 лет после образования, если предположить, что периоды превращений равны 40 годам и 1 году соответственно.

Таким образом, количества радия D и E, обнаруженные в старом радии, совпадают с результатами, полученными из других данных.

Изменение активности радия со временем

Давно известно, что активность свежеприготовленного радия сначала возрастает со временем и достигает максимума примерно через месяц. Рассмотренные только что результаты показывают, что существует дальнейшее медленное возрастание активности со временем. Это наблюдается независимо от того, как производятся измерения — по α- или по β-лучам. Примерно через 200 лет количество продуктов радия D и E практически достигнет максимальной величины. При этом одно и то же количество атомов каждого продукта C и D будет распадаться в 1 *сек*. Если каждый атом этих продуктов при распаде испускает одинаковое число (по-видимому, одну) β-частиц, то число β-частиц, испускаемых в 1 *сек*, будет вдвое больше испускаемых радием, возраст которого исчисляется несколькими месяцами. Вначале эта величина будет возрастать со скоростью около 2% в год.

Такие же соображения применимы и к α-активности. Поскольку, однако, кроме самого радия существуют еще 4 продукта радия, испускающих α-частицы, то число α-частиц, испускаемых в 1 *сек* образцом старого радия, будет не более чем на 25% превышать число частиц, испущенных радием, возраст которого равен нескольким месяцам. Активность, измеренная по α-лучам, возрастет, таким образом, не более чем на 25%, а возможно и еще меньше, так как α-частицы, излучаемые радием E, по-видимому, производят меньшую ионизацию, чем α-частицы, испускаемые другими продуктами радия. По-видимому, половина самого радия претерпевает превращение примерно за 1000 лет. Следовательно, активность радия будет возрастать до максимального значения в течение 200 лет, а затем медленно спадать со временем.

Продукты в урановой смолке

Продукты радия D и E должны присутствовать в урановой смолке (уранит) в количествах, пропорциональных количеству радия в руде, и могут быть отделены от минерала соответствующими химическими методами. Сводка радиоактивных свойств этих веществ, когда они получены в чистом виде, дана ниже.

Радий D. Сразу же после выделения этот продукт будет излучать только β-лучи (и возможно γ-лучи). Активность β-лучей должна спадать наполовину примерно через 40 лет. В соответствии с последующим превращением радия D в E, последний из которых излучает α-лучи, α-активность будет возрастать в течение нескольких лет, проходить через максимум и затем уменьшаться со временем наполовину, примерно за 40 лет. Так как скорость превращения радия D примерно в 25 раз больше скорости превращения самого радия, то активность после отделения, измеренная по количеству электронов, излучаемых в 1 *сек*, должна была бы быть в 25 раз больше активности радия такого же веса. Образующаяся в нем α-активность может быть в любой момент отделена с помощью висмутовой пластинки, опущенной в раствор с веществом.

Радий E. Вещество будет испускать лишь α-лучи и его активность будет спадать вдвое примерно за год. Поскольку скорость его превращения примерно в 1000 раз больше скорости превращения радия, то вещество такого же веса, что и радий, будет излучать примерно в 1000 раз больше α-частиц, чем свежеприготовленный радий, и примерно в 250 раз больше, чем радий, возраст которого несколько месяцев. Активность, измеренная электрическим методом, будет, вероятно, в 100 раз больше активности чистого радия.

Теперь необходимо рассмотреть вопрос о том, не были ли вещества радий D и E ранее извлечены из руды и названы другими именами. Что касается радия D, то имеются некоторые сомнения относительно того, был ли он ранее выделен. Возможно, что это составная радиоактивная часть, присутствующая в радиосвинце Гофмана, ибо этот автор утверждает, что это вещество излучает большое количество β-лучей. С другой стороны, радиосвинец, приготовленный другими исследователями, теряет свою активность очень быстро со временем.

В отношении радия E мне кажется нет никаких сомнений, что именно он и есть радиоактивная составляющая часть, присутствующая в так называемом радиотеллуре Марквальда [6]. Следует вспомнить, что Марквальд получил осадок активного вещества на висмутовой пластинке, введенной в раствор урановой смолки. Этот активный висмут испускал лишь β-лучи. Активное вещество было отождествлено с теллуром и впоследствии названо радиотеллуром. Позднее Марквальд показал, что теллур присутствует в виде примеси, и развил метод концентрирования радиоактивного вещества.

Радиоактивные части в радиотеллуре и в радии E очень схожи по химическим и радиоактивным свойствам: обе они излучают α-лучи и обе осаждаются на висмутовой пластинке, введенной в активный раствор. Я обнаружил к тому же, что α-лучи, испускаемые этими двумя веществами, аналогичны по степени проникновения в алюминий. Радиотеллур был получен от Штамера из Гамбурга в виде тонкого слоя активного вещества, осажденного на поверхности полированной висмутовой пластинки. Я не мог обнаружить какой-либо разницы в проникающей способности лучей, испущенных радием E и радиотеллуром, хотя интенсивность излучения уменьшалась алюминиевым экраном до нескольких процентов. Хорошо известно, что α-лучи большинства радиоактивных продуктов различаются по проникающей способности и совпадение α-лучей радия E и радиотеллура служит доказательством того, что в обоих случаях мы имеем одно и то же радиоактивное вещество. Совпадение поглощения лучей, а также сходство излучений и химического поведения очень убедительно доказывает идентичность этих двух продуктов. Если это так, то активность радиотеллура должна спадать вдвое примерно через год.

Здесь естественно рассмотреть такой вопрос: не аналогичен ли продукт радий E также полонию, открытому М. Кюри. Каждое из этих активных веществ оседает на висмуте и испускает только α-лучи. Исследования проникающей способности лучей не проводились, так как полоний, который имеется в продаже, обычно смешан с висмутом, а не нанесен тонкой пленкой на поверхность, подобно радиотеллуру Марквальда. Таким образом, наблюдаемая на поверхности активность обусловлена α-лучами, которые уже потеряли свою проникающую способность, ибо они прошли через различные толщины висмута. По-видимому, α-лучи, испущенные полонием, поглощаются в результате этого более сильно, чем лучи, испущенные радием E, но вполне может быть, что наблюдаемое различие всецело обусловлено различными экспериментальными условиями. М. Кюри утверждает, что активность полония спадает медленно со временем, и указывает, что один образец потерял половину своей активности за 11 месяцев. Скорость спада активности примерно такая же, какая наблюдалась для продукта радия E. Кюри, кроме того, установила, что активный продукт мог быть отделен от собственно радия осаждением на висмуте, добавленном в раствор радия. Это активное вещество, присутствующее с висмутом, могло быть сконцентрировано точно таким же способом, который применялся для полония, полученного прямо из раствора урановой смолки. Гизель уже давно наблюдал, что висмут становился активным, когда его помещали в раствор радия, и считал, что полоний на самом деле есть «наведенный висмут». Продукт, осевший на висмуте, должен был быть в обоих случаях радием E, так что мы имеем здесь прямое подтверждение того, что полоний и радий E имеют сходные химические свойства.

В первой статье, в которой описано открытие полония, М. Кюри утверждала, что активное вещество могло быть сконцентрировано до

некоторой степени нагреванием активного сульфида в вакууме. Активный сульфид был более летуч, чем висмут, и осаждался на частях стеклянной трубки при температуре между 300 и 350° С. С другой стороны, я показал, что радий Е, осевший на платиновой пластинке, не проявляет заметной летучести при температурах до 1000° С. Мы намерены продолжить исследования в этой области, чтобы выяснить, каковы различия в поведении — кажущиеся или реальные.

Я думаю, что эксперименты объясняются наилучшим образом с той точки зрения, что полоний и радиотеллур оба содержат в качестве составной части пятый радиоактивный продукт распада радия. Наиболее определенным методом идентификации вещества служит сравнение скоростей спада активности трех активных веществ; эксперименты такого рода уже проводятся.

Большое значение имело бы выделение продукта радий D из урановой смолки, который во многих отношениях был бы так же полезен для науки, как и сам радий. Активность чистого продукта радий D, измеренная по β-лучам, примерно в 25 раз больше активности радия, а скорость спада его активности достаточно мала, и ею в большинстве экспериментов можно пренебречь.

Сейчас проводятся эксперименты по созданию простых методов отделения радия D от урановой смолки [1].

Мак-Гиллский университет, Монреаль,
25 августа 1904 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rutherford E., Soddy F.* Phil. Mag., April, May, 1903.
2. *Rutherford E.* Bakerian Lecture. Roy. Soc. London, 1904.
3. *Curie M., Curie P.* Thèses présentées à la Faculté des Sciences. Paris, 1903, p. 116.
4. *Giesel.* Ber. Dtsch. chem. Ges., 1903, 2368.
5. *Curie P., Danne.* Compt. Rend., 1903, **136**, 364.
6. *Marckwald.* Ber. Dtsch. chem. Ges., 1902, 2285.

[1] Б. Болтвуд из Нью-Хэвена (Коннектикут) любезно прислал мне несколько дней назад образец радиоактивного свинца, который он выделил из урановой смолки 4 месяца назад. Этот свинец испускает необычно много β-лучей по сравнению с α-лучами, а полное число β-лучей, испускаемых им, было примерно равно числу лучей, испускаемых ураном, присутствующим в руде, из которой он был выделен. Растворением свинца часть α-активности была перенесена на висмутовую пластинку. Я думаю, что свинец, вероятно, содержит продукт радий D. Эти результаты показывают, что Гофман, чьи ранние работы по радиосвинцу подвергались суровой критике, был, вероятно, прав, полагая, что он выделил новое радиоактивное вещество со свинцом, активность которого не спадала со временем.

РАДИЙ—ПРИЧИНА ЗЕМНОГО ТЕПЛА*

Взаимосвязь между науками очень интересно иллюстрируется той полемикой, которая рзгорается периодически вот уже более половины столетия между представителями физики, с одной стороны, и геологии и биологии, с другой, по очень важному вопросу о возрасте Земли.

Ранние геологические исследования показали, что поверхность Земли в прошлом подвергалась глубоким изменениям. Этот процесс изменения продолжается хотя и медленно, но непрерывно и в настоящее время. Сравнивая поразительные изменения, которые произошли на поверхности Земли в прошлом, с медленными изменениями, происходящими в настоящее время, геологи вынуждены были прийти к выводу, что потребовалось огромное количество времени, чтобы получились такие результаты.

В начале прошлого столетия в геологии существовали две точки зрения по вопросу об изменениях Земли. Одни считали, что силы, вызвавшие эти изменения, действовали с огромной интенсивностью в ранние периоды существования мира, а другие приписывали результат обычному действию природы, имеющему место и сегодня, в сочетании с элементом неограниченного времени. Второе утверждение или «доктрина однородности» в геологии, долгое время высказываемая геологами, очень хорошо описана Плейфером [1].

Математики рассчитали, что если пренебречь силами трения, то движения планет устойчивы, хотя и подвержены периодическим колебаниям. Это, вероятно, имело отношение к тому, что написал Плейфер: «Как часто эти чередования распада и восстановления повторялись, нам не определить; они образуют ряд, у которого, как заметил автор этой теории, мы никогда не увидим ни начала, ни конца; это обстоятельство хорошо согласуется с тем, что известно относительно других частей структуры мира... Творец природы не дал законов мира, которые, подобно институтам людей, несут в себе элементы их собственного разрушения. Он не допустил в своих работах никаких признаков младенчества или старости, или каких-нибудь признаков, по которым мы могли бы оценить либо их будущее, либо продолжительность их прошлого. Он может положить конец, как несомненно некогда в определенное время дал начало существующей системе; но мы можем надежно заключить, что эта грандиозная катастрофа не будет следствием какого-либо из существующих в настоящее время законов и что на это не указывает ничто из того, что мы ощущаем».

* Harper's Magazine, 1905, 390—396. February.

Изучение ископаемых, сохранившихся в различных геологических напластованиях, отчетливо показало, что формы жизни, существовавшие на Земле в различные времена, прошли через ряд этапов. Дарвинское «Происхождение видов» со всей очевидностью показало, что время, требуемое для непрерывного развития жизни, по теории эволюции должно быть очень велико. Так как, однако, различные формы жизни, обнаруженные в следующих один за другим геологических напластованиях, указывают на этапы эволюции, очевидно, что биологическое и геологическое времена одинаковы и что независимо от того, какое время согласно одной из наук потребовалось для таких изменений, такое же время должна признать и другая наука.

Примерно в середине прошлого столетия на геологическую арену вступили физики, представленные лордом Кельвином (тогда профессор Томсон), Тэйтом и Гельмгольцем, и сразу приступили к установлению предела продолжительности жизни на Земле. Кельвин шел во главе этого движения. В ряде замечательных работ, дополненных серией популярных статей, он показал, что длительность существования жизни не может, вероятно, превышать сотни миллионов лет. Эти выводы аргументировались продолжительностью теплового состояния Солнца и Земли и действием морских приливов и отливов на период вращения Земли. Хотя Кельвина в этом поддерживало большинство физиков, его выводы в разные времена очень сильно критиковались не только геологами и биологами, но и некоторыми представителями астрономии и физики. Хаксли стал на сторону геологов и в качестве защитника их идей подверг обсуждению и критике данные, на которых Кельвин основывал свои выводы. Позиция геологов в то время по отношению к этому вторжению физиков в их область очень занятно выражена Хаксли [2]. «Этот результат профессора Томсона, хотя и очень либеральный в допущении времени, оскорбил чувства геологов, привыкших оперировать со временем как с неопределенным фактором, и они, естественно, чувствуют замешательство и смятение при любых попытках физической науки установить некоторый предел их гипотезам».

Дискуссия продолжалась с перерывами всю вторую половину столетия. Геологи, определяя скорость эрозии пород и скорость образования отложений в различных местностях, пытались оценить время, которое требуется, чтобы произошли геологические изменения. По общему признанию, эти заключения весьма сомнительны, но, несмотря на существенные различия во мнениях самих геологов, сами они в основном готовы признать, что, вероятно, было бы достаточно сотни миллионов лет. Так же быстро, как геологи отказались от своих оценок, Кельвин, по мере увеличения точности имеющихся в его распоряжении научных данных, все больше сокращал время геологической и биологической эволюции на Земле. Из числа различных физических аргументов, пригодных для установления предела продолжительности жизни на нашей Земле, наиболее существенный основывается на расчете продолжи-

тельности солнечного тепла. Очевидно, что существование жизни на Земле, насколько мы знаем, зависит от непрерывного поступления света и тепла от Солнца. Любое ощутимое уменьшение потока тепла сразу сделало бы большую часть поверхности Земли необитаемой, а если бы Солнце погасло, то поверхность Земли очень скоро приобрела бы температуру, близкую к абсолютному нулю, и тогда исчезли бы все формы жизни. Аргумент, который основывается на продолжительности внутриземного тепла, хотя второстепенной важности, представляет все же большой интерес для установления возможного предела на основе данных, полученных из изучения самой Земли. Вывод, базирующийся на эффекте трения, вызванного приливами и отливами и приводящего к постепенному увеличению периода вращения Земли, хотя и представляет значительный философский интерес, не является столь прямым, но все же служит опровержением старой доктрины однородности в геологии. Кельвин рассчитал, что, по всей видимости, 100 млн. лет назад Земля вращалась примерно на 3% быстрее, чем в настоящее время, и если мы возвратимся назад, к более раннему периоду, 10 000 млн. лет назад, то получится. что Земля тогда должна была вращаться вдвое быстрее. Центробежные силы, вызванные движением Земли, должны были быть в 4 раза больше, и, следовательно, форма Земли и распределение суши и воды должно было сильно отличаться от того, что наблюдается сегодня.

В этой статье можно привести лишь краткое резюме аргументов, из которых были выведены возраст Солнца и Земли. Сначала мы рассмотрим вопрос о продолжительности тепла Земли. Наблюдения, проведенные в скважинах и шахтах в различных районах Земли, показали, что по мере продвижения вглубь температура возрастает. Величина возрастания несколько различна в разных точках и зависит, по-видимому, от природы геологических отложений, но было найдено, что в среднем на каждый фут глубины температура возрастает примерно на $^1/_{50}{}^\circ$ F. На глубине в 1 милю температура была бы, таким образом, на 100° F выше, чем на поверхности. Чтобы рассчитать подземное тепло, которое проявляется так отчетливо в вулканических взрывах Кельвин предположил, что первоначально Земля была очень горячим телом и постепенно остывала, пока не достигла теперешнего состояния.

Рассмотрим для иллюстрации большой сферический камень, равномерно нагретый до высокой температуры в печи, а затем оставленный на воздухе остывать. Вследствие быстрой потери тепла на излучение и конвекцию внешняя оболочка быстро остынет. Внутренняя область камня будет, однако, довольно долго сохранять высокую температуру. Для остывания внутренних областей камня тепло должно выводиться наружу через массу камня. Истечение тепла будет медленным, так как камень — очень плохой проводник тепла. В любой момент времени в течение всего периода остывания температура будет выше во внутренних областях камня; от поверхности камня к его центру она постепенно увеличивается. Далее, знаменитое решение Фурье уравнения теплопровод-

ности позволяет нам рассчитать температуру в любой точке камня в любой момент времени после начала остывания, если только начальная температура, а также теплопроводность и удельная теплоемкость камня известны. И наоборот, если температура в любой определенной точке камня измеряется, мы могли бы с помощью теории рассчитать, как долго остывает камень. Это как раз та проблема, которая стояла перед Кельвином при расчете продолжительности земного тепла. Земля может рассматриваться как сферический камень диаметром примерно 8000 миль. Приняв, что Земля была первоначально нагрета до определенной высокой температуры, а затем стала остывать, надо выяснить, сколько времени должно пройти, пока температурный градиент на поверхности Земли не станет равным температурному градиенту, наблюдаемому в настоящее время, т. е. $^1/_{50}{}^\circ$ F на фут? Далее, время, требуемое на остывание до современного состояния, будет, очевидно, тем больше, чем выше начальная температура Земли. Чтобы получить максимальную оценку необходимого времени, Кельвин предположил, что вся Земля первоначально была при температуре расплавленного камня, и определил, что должно было пройти около 100 млн. лет, чтобы Земля могла остыть до ее современного состояния. Точность расчета невелика, так как мы пренебрегаем зависимостью теплопроводности и удельной теплоемкости материала Земли от температуры и давления. В последнем сообщении Кельвин [3] еще больше сократил свою оценку и пришел к выводу, что возраст Земли «больше двадцати, но меньше сорока миллионов лет, и, вероятно, много ближе к двадцати, чем к сорока» [3].

Середина прошлого столетия была отмечена установлением великого принципа сохранения энергии. Одним из первых плодов применения этого принципа было объяснение Гельмгольцем происхождения солнечного тепла. Он предположил, что энергия, непрерывно излучаемая Солнцем, поддерживается путем постепенного уменьшения его объема под действием сил гравитации. Следуя известной небулярной космогонической гипотезе Канта и Лапласа, предполагалось, что Солнце первоначально было образовано соединением либо многочисленных туманностей, либо ряда более мелких тел, которые сблизились под влиянием гравитационного притяжения. Мы знаем, что энергия движения пули при ударе в мишень частично переходит в тепло и, следовательно, пуля становится теплой. Аналогично, когда тело падает на Солнце, оно приобретает при этом падении большую скорость и его энергия движения при ударе о Солнце в конечном счете превращается в тепло. Таким образом, по мере концентрирования солнечной массы происходил ее разогрев, причем часть тепла уходила на увеличение температуры Солнца, а другая часть тратилась на излучение в пространство. Из расчетов Пуйе и Лэнгли мы знаем, что энергия, излучаемая Солнцем, эквивалентна энергии, выделяемой при сгорании примерно 1500 фунтов угля в час на каждый квадратный фут солнечной поверхности. Несмотря на такое огромное излучение энергии, Гельмгольц рассчитал, что тепла, выделяющегося Солнцем под действием

сжатия, было бы достаточно для того, чтобы оно продолжало светить так же ярко, как оно светит в настоящее время, еще примерно 40 млн. лет. Расчет не совсем точен, так как мы не знаем, как меняется плотность Солнца от центра к периферии.

Кельвин пришел почти к такому же выводу и заявил, что «кажется поэтому в целом наиболее вероятным, что Солнце не освещало Землю в течение 100 млн. лет, и почти определенно, что оно не делало этого в течение 500 млн. лет. Что касается будущего, то можно сказать с равной определенностью, что жители Земли не смогут продолжать наслаждаться необходимым для их жизни светом и теплом еще многие миллионы лет, *«разве что в величайшей сокровищнице мироздания приготовлены пока нам неизвестные источники энергии»*.

Это последнее замечание кажется почти пророческим в свете открытия тел, подобных радию, который излучает огромное количество энергии. Кельвин заключил также, что, по всей вероятности, количество излучаемого Солнцем тепла будет оставаться на том уровне, который имеется сейчас, еще не более 5 или 6 млн. лет. Гельмгольц указал на то, что солнечное тепло не может быть объяснено химическими процессами. Он рассчитал, что если бы Солнце состояло из водорода и кислорода, в той пропорции, которая необходима для образования воды, то тепла, генерируемого этой смесью, не было бы достаточно, чтобы поддерживать существующий поток солнечного тепла больше 4000 лет, а ведь соединение этих веществ выделяет энергии больше, чем другие известные химические реакции. Кельвин показал, что обычных химических реакций недостаточно для объяснения внутренней температуры Земли.

Тепла, выделяемого при возможных химических процессах, совершенно недостаточно для объяснения тепла Солнца и Земли, однако недавнее открытие способности радиоактивных тел излучать количество энергии, превышающее примерно в миллион раз то, которое выделяется при самых энергичных химических реакциях, позволяет совершенно по-другому подойти к этому вопросу. Эти радиоактивные тела, из которых наиболее известны радий, уран, торий и актиний, обнаруживаются главным образом в урановой смолке. Недавно внимание было сконцентрировано на веществе радий, который столь интенсивно излучает тепло и другие формы энергии, что привлекает к себе внимание не только ученых, но и людей, далеких от науки. Излучение, испускаемое радием и способное производить столь заметные световой, фотографический и электрический эффекты, качественно очень сходно с излучением, испускаемым уже упомянутыми другими радиоактивными телами, но отличается от них по интенсивности. При равном весе радий излучает энергию более чем в миллион раз быстрее, чем уран или торий. Вдобавок к его проникающему излучению радий также излучает тепло со сравнительно большой скоростью. Кюри и Лаборд недавно обнаружили замечательный факт, что температура кусочка радия всегда несколько превышает температуру окружающего воздуха. Количества тепла, излучаемого радием, достаточ-

но, чтобы за 1 *час* расплавить кусок льда, равный ему по весу. Эта скорость теплового излучения постоянна и, насколько показывают наблюдения, не уменьшается заметно со временем. За год 1 фунт радия излучил бы столько энергии, сколько получается при сгорании 100 фунтов лучшего угля, но по истечении этого времени радий оставался бы, очевидно, неизменным и продолжал бы выделять тепло с прежней скоростью. Можно довольно надежно рассчитать, что хотя действительное количество тепла, которое можно получить от радия за год, должно медленно уменьшаться со временем, в среднем он будет излучать тепло с прежней скоростью в течение примерно 1000 лет.

Следует упомянуть о еще более примечательном факте. Как показали Барнс и автор, более $^3/_4$ теплового эффекта радия обусловлено радиоактивной эманацией, запасенной в нем. Эта эманация представляет собой тяжелый радиоактивный газ, непрерывно генерируемый в очень малых количествах самим радием. Эманация, выделенная нагреванием или растворением радия, собиралась в маленькую стеклянную трубочку. Через несколько часов оказалось, что трубочка с эманацией выделяет 75% тепла, первоначально излучаемого радием, хотя количество находившейся в ней эманации было настолько малым, что невозможно было измерить ни ее вес, ни объем. В то же время тепловой эффект радия уменьшился до $^1/_4$ первоначальной величины. Скорость излучения тепла эманацией уменьшается со временем по геометрической прогрессии, спадая до половины начальной величины примерно через 4 дня. С другой стороны, радиевая смесь, из которой была выделена эманация, через месяц самопроизвольно восстанавливает свой тепловой эффект.

Вильям Рамзай и Содди недавно обнаружили, что объем радиевой эманации, запасенной в 1 *г* радия, равен примерно 1 *мм*^{3} при атмосферном давлении и температуре. Известно, что эманация—это тяжелый газ, и, принимая ее молекулярный вес в 100 раз больше веса водорода, можно рассчитать, что если бы можно было собрать эманацию весом в 1 фунт, она первоначально излучала бы энергию со скоростью примерно 8000 *л. с.* Выход энергии в виде тепла падал бы со временем, но полное количество энергии, выделенное в течение времени жизни эманации, соответствовало бы количеству энергии, необходимому для работы машины в 10 000 *л. с.* в течение 5 дней.

Поскольку нет сомнений в том, что некоторое количество радия, предоставленного самому себе, с течением времени превратится в эманацию и другие продукты, то ясно, что по крайней мере такое же количество энергии должно быть выделено радием за время его превращения. Согласно современным взглядам, излучение энергии есть следствие распада атома радия и превращения его в последующие радиоактивные продукты. Распад имеет взрывной характер и сопровождается испусканием града материальных частиц с огромными скоростями. Эти испущенные частицы, известные как α-частицы, имеют примерно такую же массу, как атом гелия, и, вероятно, и есть атомы гелия. Они испускаются со скоростью

около 20 000 *миль/сек* и, следовательно, обладают энергией движения, огромной по сравнению с их массой. Несмотря на их огромную скорость, эти частицы легко тормозятся в веществе, и большая часть частиц, испущенных кусочком радия, поглощается самим радием. Их энергия движения переходит тут же в тепло, а радий, следовательно, разогревается под действием самобомбардировки. Точно так же тепловой эффект эманации и ее продуктов обусловлен интенсивной бомбардировкой стенок сосуда, в котором они заключены, α-частицами, испускаемыми в момент распада. Так как все радиоактивные вещества испускают частицы, то каждое из них, вероятно, излучает тепло со скоростью, пропорциональной его радиоактивности. Тепловой эффект урана, по всей видимости, примерно в миллион раз меньше теплового эффекта радия такого же веса.

Наибольшие количества радиоактивных веществ обнаружены в урановой смолке, однако оказалось, что радиоактивное вещество распределено в очень малых количествах по всей атмосфере и земной коре. Много из наших знаний в этой важной области обязано своим происхождением блестящим работам Эльстера и Гейтеля, профессоров высшей школы Вольфенбюттеля в Германии.

Эманация радия и другие радиоактивные вещества присутствуют повсюду в атмосфере. Эти радиоактивные газы обладают свойствам превращаться в нелетучие виды вещества, которые оседают на поверхности тел и могут быть собраны на проволочке, заряженной отрицательно. Каждая падающая дождевая капля и снежинка приносит некоторое из этих радиоактивных веществ на Землю, причем каждая травинка и листик покрываются невидимой пленкой радиоактивного вещества.

Эти эманации в самом воздухе не образуются, а выделяются из земной коры, которая насыщена радиоактивным веществом. Если трубу опустить в обычную садовую почву, то засосанный через трубу воздух будет заметно радиоактивен. Воздух в ограниченных пространствах, подобных полостям и камерам, в большинстве случаев сильно радиоактивен за счет присутствия эманаций, которые выделяются из почвы. Радиевая эманация была обнаружена в воде из глубоких колодцев и родников, в поверхностных и озерных водах, в выделяющейся природной углекислоте и в нефти из скважин. Найдено, что вода из многих горячих источников содержит необычно большое количество радиевой эманации. Эльстер и Гейтель показали, что сама почва радиоактивна в различной степени, причем наиболее заметной активностью обладают глинистые осадки. Было обнаружено, что грязь, осевшая из горячего источника в Баттаглии (Северная Италия), содержит очень большое количество радиоактивного вещества. Практически каждое вещество, подвергавшееся анализу, обладало небольшой активностью.

Метод обнаружения слабой радиоактивности обычных веществ зависит от свойств излучений, вызывающих разряд наэлектризованного тела. Электроскоп с золотыми листочками как способ обнаружения радиоакo з , ества по точности значительно превосходит даже спектроскоп.

Имея в распоряжении лишь 1 *г* вещества, можно легко обнаружить присутствие такого малого количества радия, как одна стомиллиардная часть. Если исследовать большие количества вещества, то легко заметить присутствие еще меньших количеств радия на единицу массы.

Поскольку радиоактивные вещества, присутствующие в Земле, непрерывно излучают α-частицы, должно выделяться тепло в количестве, пропорциональном количеству присутствующего активного вещества и его интенсивности излучения. Тогда возникает вопрос, достаточно ли того радиоактивного вещества, которое содержится в Земле, для нагревания ее в сколь-нибудь заметной степени? Я полагаю, что даже на нынешнем уровне наших знаний на этот вопрос следует ответить утвердительно.

Взяв величину теплопроводности горных пород, используемую Кельвином, и зная средний температурный градиент, можно легко рассчитать количество внутреннего тепла, теряемого в 1 *сек* Землей за счет проводимости к ее поверхности. Так как 1 *г* радия каждый час излучает количество тепла, достаточное для нагревания 100 *г* воды на 1° С, то простой расчет показывает, что современные потери тепла Землей эквивалентны потерям от присутствия примерно 270 млн. *т* радия. Это количество может показаться огромным по сравнению с малыми количествами радия, выделенного до сих пор, но по сравнению, например, с годовой добычей угля во всем мире оно мало. Можно легко подсчитать, что если это количество радия равномерно распределено по всей земной коре, то в единице массы его будет содержаться лишь пять частей на 100 000 млрд. Это очень малое количество, а расчеты, основанные на наблюдениях Эльстера и Гейтеля, показывают, что радиоактивность, обнаруженная в почвах, соответствует примерно такому относительному количеству радия. В некоторых почвах оно больше, в других — меньше, и в этих расчетах не принималось во внимание содержание урана и тория. Требуется сделать большое количество измерений радиоактивности различных веществ в Земле, прежде чем можно считать такой вывод обоснованным, но величина наблюдаемой радиоактивности определенно наводит на размышление.

При этих расчетах не предполагалось, что радиоактивность почвы обусловлена одним лишь радием. Другие виды радиоактивного вещества, несомненно, тоже присутствуют, но для простоты результаты представлены, исходя из такого количества радия в почве, которое необходимо для обеспечения наблюдаемой радиоактивности.

Если радиоактивное вещество распределено во всей Земле в той степени, как показывает эксперимент, то тепло, выделяемое радиоактивным веществом, будет компенсировать тепловые потери Земли вследствие проводимости к поверхности. Согласно такому взгляду существующее в настоящее время внутреннее тепло Земли поддерживается на постоянном уровне за счет выделения тепла содержащимся в ней радиоактивным веществом. Выполненный Кельвином расчет возраста Земли, в котором предполагалось, что Земля — это просто остывающее тело, не имеющее

внутренних источников тепла, неприменим, так как существующий температурный градиент Земли мог быть почти таким же уже длительное время.

Было ли внутреннее тепло Земли в первую очередь обусловлено радиоактивным веществом или другими источниками,— вопрос очень спорный, так как для этого необходимо рассмотреть происхождение Земли как части Солнечной системы. Какая бы точка зрения ни была бы принята, не может быть никаких сомнений в том, что открытие существования радиоактивного вещества в Земле вызывает серьезное сомнение в правдоподобности расчетов возраста Земли, основанных на предположении, что это просто остывающее тело, и указывает на то, что существующее в настоящее время внутреннее тепло будет поддерживаться в течение значительно более долгого времени, чем предполагалось ранее. Согласно этой теории постоянства внутреннего тепла нельзя установить предел возрасту Земли, но могут быть сделаны заключения о возможных изменениях внутреннего тепла со временем.

Полученные экспериментальные данные указывают, что предоставленный самому себе радий претерпит превращение наполовину примерно за 1000 лет. Если бы весь мир первоначально состоял из чистого радия, его активность через 20 000 лет не превышала бы активности, наблюдаемой в урановой смолке сегодня. Так как Земля намного старше, то для объяснения наличия радия необходимо предположить, что радий — это переходный элемент, непрерывно образующийся при распаде некоторых других веществ. В этом смысле радий ведет себя как его продукт, эманация радия, причем единственное отличие состоит в том, что радий распадается существенно медленнее. Наиболее вероятным предшественником радия является уран, с которым его всегда находят связанным в урановой смолке. Эта точка зрения недавно получила сильную экспериментальную поддержку. Болтвуд из Нью-Хэвена показал, что количество радия, имеющегося в урановой смолке, всегда пропорционально количеству урана. К тому же обнаруженное в урановой смолке количество радия примерно соответствует тому, которое следует ожидать, если радий есть продукт распада урана. Решением этого вопроса о происхождении радия сейчас энергично занят ряд исследователей, и, вероятно, вскоре можно будет получить однозначный ответ.

Если уран есть предшественник радия, то количество присутствующего в Земле радия будет всегда пропорционально количеству урана, так что жизнь радия зависит от жизни урана. По-видимому, период полураспада урана и тория составляет 1000 млн. лет, так что если радиоактивное вещество на Земле в основном образуется при распаде одного или обоих этих продуктов, то следует ожидать, что образующееся в Земле тепло будет уменьшаться вдвое примерно за 1000 млн. лет. Таким образом, Земля будет остывать очень медленно и была, вероятно, горячее в прошлом. Однако никаких оценок возраста Земли на основе наблюдающегося в настоящее время количества внутреннего тепла сделать нельзя.

Коснемся теперь вопроса о влиянии радиоактивного вещества на увеличение возможной продолжительности солнечного тепла. Вспомним, что Кельвин пришел к выводу, что современный уровень мощности излучения света и энергии сохранится, видимо, не более 5 или 6 млн. лет.

Простой расчет показывает, что наличие в Солнце радия, составляющего лишь 2,5 миллионной части его массы, может объяснить существующую скорость испускания энергии. Прямого доказательства наличия радиоактивного вещества на Солнце не существует, однако подобие химических составов Солнца и Земли свидетельствует в пользу такого предположения. С помощью спектроскопа обнаружено присутствие на Солнце редкого газа гелия, а это есть косвенное указание на наличие радиоактивного вещества, так как Рамзай и Содди показали, что гелий непрерывно выделяется радием. Небольшие следы радиоактивного вещества не привели бы к значительному увеличению продолжительности солнечного тепла по сравнению с существующей оценкой, но в связи с этим имеется другая возможность, на которую нельзя не обратить внимания.

Вполне возможно, что под влиянием очень высокой солнечной температуры атомы нерадиоактивных элементов могут распадаться на более простые формы с выделением большого количества энергии. Современная электрическая теория вещества требует, чтобы атомы более тяжелых элементов содержали огромное количество скрытой энергии, которая должна выделяться при распаде атома. Если этот запас атомной энергии возможен на Солнце и если обычное вещество, распадаясь, испускает столько же тепла, сколько и радий, то отсюда можно вывести, что продолжительность солнечного тепла увеличится примерно в 100 раз по сравнению с оценкой по теории конденсации. Спектроскопические наблюдения Локьера показывают, что более горячие звезды, видимо, состоят лишь из более простых форм вещества, таких, как гелий и водород, тогда как в более холодных звездах обнаружено существование тяжелых элементов. Эти факты подтверждают точку зрения, что под действием интенсивного тепла элементы распадаются на более простые формы.

Если это тепло атомного распада существует, его было бы достаточно для поддержания нынешнего излучения энергии Солнцем примерно на 5 млн. лет — период времени, который и геологи и биологи сочли бы достаточным для процессов органического развития, тогда как продолжительность солнечного тепла в будущем, возможно, следует увеличить в 100 раз по сравнению с оценкой, сделанной Кельвином.

Хотя подобные рассмотрения могут увеличить оцененную нами вероятную длительность солнечного тепла, наука приводит к неизбежности вывода Кельвина и Гельмгольца о том, что Солнце неминуемо должно остыть, а наша Земля должна превратиться в мертвую планету.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Playfair*. Illustrations of the Huttorian Theory.
2. *Huxley*. Presidental Address. Geol. Soc., London, 1869.
3. *Kelvin*. Phil. Mag., 1899.

Г. Н. ФЛЕРОВ

РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О РАДИОАКТИВНОСТИ В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ

Впервые на русском языке издается собрание трудов Э. Резерфорда. Вклад этого человека в мировую науку столь значителен, что никакие самые почетные эпитеты, поставленные перед его именем, не были бы преувеличением. С именем Э. Резерфорда связано возникновение ядерной физики, бурное развитие которой не только произвело революцию в естествознании, но и привело к тому, что роль науки в жизни общества неизмеримо возросла.

Во времена Резерфорда ядерная физика была предметом интереса лишь узкого круга ученых, она была заперта в стенах лабораторий как наука, весьма далекая от практических применений. В наши дни она снабжает новыми методами исследований химию, биологию, медицину, астрономию, археологию, геологию, широко используется в промышленности и энергетике. Сейчас ядерной физикой занимаются тысячи ученых. В их распоряжении имеются такие мощные средства исследования, как ускорители заряженных частиц и ядерные реакторы, стоимость которых настолько значительна, что учитывается в общегосударственном бюджете. В экспериментах используются различные детекторы излучения, позволяющие с высокой точностью определить его характеристики. Все это в совокупности со сложнейшей электронной аппаратурой и вычислительными машинами позволяет исследовать весьма деликатные явления микромира.

Какое же значение имеет переиздание в наше время трудов Эрнеста Резерфорда? Прежде всего это, конечно, свидетельство глубокого уважения к его памяти и признание исключительного места, занимаемого им в истории науки. Но это не все и не главное. Главное заключается в том, что и по сей день работы Резерфорда должны рассматриваться как предмет изучения, как материал, на котором следует воспитывать молодое поколение физиков. В наше время физический эксперимент часто напоминает сложный производственный процесс, расчлененный на отдельные операции, с неизбежным разделением труда среди участников. Тем более важно воспитывать в молодых ученых умение видеть всю проблему в целом, учить логике экспериментирования. Из нашего лексикона почти исчезло слово «естествоиспытатель». А ведь именно оно отражает основное содержание того, чем должен заниматься физик-экспериментатор. Чтобы понять суть того или иного явления, экспериментатор «задает вопросы» природе. Чем выше искусство ученого, чем он талантливее, тем меньшее количество «вопросов» приведет его к пониманию. Работы Э. Резерфорда — блестящий пример того, как следует выбирать оптимальный путь, ведущий к сердцу проблемы.

Сейчас издаются десятки журналов по ядерной физике. Ежегодно появляются сотни статей, насыщенных описанием сложной аппаратуры, с обилием таблиц и графиков. Но значительную долю этих публикаций я отнес бы к разряду «метрологии», а не экспериментальной физики. К сожалению, похожая ситуация наблюдается и в теоретической физике: громоздкие численные расчеты, ставшие возможными благодаря электронным вычислительным машинам, потеснили истинную теоретическую мысль. Конечно, накопление фактов — неизбежный этап, подготавливающий новые качественные выводы. Но как часто это коллекционирование превращается в самоцель, парализует продвижение вперед. Как бы ни была велика дистанция между современной лабораторией и возможностями физиков начала века, работы Резерфорда — настоящая энциклопедия для исследователя. Они раскрывают душу экспериментальной работы. Они учат смелости и последовательности, точности и простоте, учат за фактами видеть природу.

Школа Резерфорда оказала громадное влияние на развитие ядерной физики в Советском Союзе и прямым и косвенным образом. Учениками Резерфорда являются такие выдающиеся физики-ядерщики, как А. И. Лейпунский, К. Д. Синельников, Ю. Б. Харитон, которые создали собственные школы, во многом определившие лицо советской ядерной физики наших дней. Любимцем Резерфорда был П. Л. Капица. Вернувшись на Родину после длительной работы в Кавендишской лаборатории, он привез резерфордовскую любовь к эксперименту, страсть исследователя, которые поставил во главу всей научной деятельности.

Я вспоминаю свою работу в предвоенные годы в Ленинградском физико-техническом институте, которым руководил тогда А. Ф. Иоффе. Для нас, молодых физиков, труды Э. Резерфорда были источником вдохновения, учебным пособием, помогавшим выработать собственный экспериментальный почерк. Книга «Искусственное разложение элементов» буквально штудировалась глава за главой. Отдельные эксперименты Резерфорда мы анализировали, как шахматные этюды. Исходя из цели опыта, пытались найти наиболее эффективное решение и всегда убеждались, что путь, избранный Э. Резефордом, был наиболее прост и изящен.

Эта статья не претендует на обзор того, как развивались в Советском Союзе все направления ядерной физики, начало которым было положено Резерфордом. Мы ограничимся только работами, связанными с исследованием радиоактивности.

Одной из первых заявок Советской науки на серьезное участие в мировой ядерной физике было открытие в 1934 г. А. И. Алихановым и М. С. Козодаевым внутренней парной конверсии. Это явление нашло широкое применение в спектроскопии жесткого γ-излучения. К 1936 г. относятся замечательные эксперименты ученика Э. Резерфорда — А. И. Лейпунского по проверке закона сохранения энергии при β-распаде. Нарушение этого фундаментального закона всерьез обсуждалось в те годы как один из вариантов гипотезы, объясняющий сплошной спектр β-час-

тиц. А. И. Лейпунский предложил и осуществил опыт, который был на пределе экспериментальных возможностей тех дней. Идея опыта заключалась в том, чтобы измерить спектр атомов отдачи с очень малой энергией (10—100 *эв*). Результаты этого эксперимента дали первое качественное подтверждение гипотезы нейтрино.

В 1935 г. И. В. Курчатов, Б. В. Курчатов, Л. И. Русинов и Л. В. Мысовский открыли явление изомерии искусственных радиоактивных изотопов. Остроумный анализ радиоактивности, возникавшей при облучении брома нейтронами и γ-лучами, привел к выводу, что при распаде Br^{80} проявляются два периода, соответствующие основному и метастабильному состояниям. Четкий эксперимент, глубокое проникновение в суть явления, характерные для метода Резерфорда, были продемонстрированы И. В. Курчатовым с сотрудниками. Впоследствии Л. И. Русинов, А. П. Гринберг, А. А. Юзефович показали, что при распаде изомеров существенную роль играет внутренняя конверсия. Эти работы положили начало целому направлению ядерной физики, которое и по сей день служит источником информации о свойствах ядерных состояний.

После открытия деления урана нейтронами (О. Ганом и Ф. Штрассманом) интересы ядерных физиков резко поляризовались в сторону исследования этого явления. Идея использования ядерных процессов для получения энергии уже висела в воздухе. В 1935 г. Ф. Жолио в своей Нобелевской лекции говорил: «Если, обратившись к прошлому, мы бросим взгляд на успехи, которые были достигнуты наукой во все убыстряющемся темпе, то мы вправе думать, что исследователи, конструируя или разрушая элементы по своему желанию, смогут осуществить ядерные превращения взрывного характера, настоящие цепные химические реакции. Если окажется, что такие превращения распространяются в веществе, то можно составить себе представление о том огромном освобождении полезной энергии, которое будет иметь место».

В работах О. Фриша, Л. Мейтнер и Ф. Жолио было показано, что при делении урана нейтронами выделяется огромная энергия. В результате деления должны были образовываться возбужденные ядра, которые могли испускать нейтроны. Именно эти особенности деления и открывали, в принципе, возможность осуществления цепной ядерной реакции.

С этого момента все внимание ядерщиков в ЛФТИ было направлено на изучение урана. Опираясь на теоретический анализ условий осуществления самоподдерживающейся цепной ядерной реакции, данный в фундаментальной работе Ю. Б. Харитона и Я. Б. Зельдовича, И. В. Курчатов счел важным экспериментально ответить на вопрос о возможности этого процесса на быстрых нейтронах с использованием большой массы естественного урана. В то время наши знания о процессах взаимодействия нейтронов с ураном были далеко недостаточны. Можно было идти последовательным путем измерения всех необходимых констант, но можно было попытаться решить задачу «в лоб» — в духе и традициях Резерфорда. Был предложен эксперимент, который должен был прямо ответить

на вопрос. Эксперимент состоял в наблюдении изменения потока нейтронов, вызывающих деление, в условиях, когда внутрь массивной сферы из естественного урана помещались нейтронные источники. Это был *experimentum crucis*, который должен был сразу привести к ответу.

Для проведения опытов был необходим индикатор нейтронов, вызывающих деление, с чувствительностью, в десятки раз превышающей обычные делительные камеры. К. А. Петржак и автор этих строк разработали многослойную ионизационную камеру, примерно в 200 раз более чувствительную, нежели обычные приборы. Этот прибор позволил довольно быстро разобраться в задаче, для которой он был создан. Вместе с тем в экспериментах по определению фона были сделаны наблюдения, которые привели к открытию нового вида радиоактивного распада — спонтанного деления ядер. Спонтанное деление могло проявиться в наших опытах только потому, что чувствительность методики была рекордно высокой. Однако опыты не были специально нацелены на поиск этого эффекта и важно было не пройти мимо «фона», который и не слишком мешал основным измерениям. Классические работы Резерфорда научили нас быть внимательными к любым деталям эксперимента, не оставлять в полученных данных ни одного туманного места. Подробно история открытия спонтанного деления неоднократно описывалась, и я не буду здесь рассказывать о многочисленных комбинациях контрольных опытов, которые были проведены для того, чтобы первые наблюдения превратились в доказательство существования нового вида естественной радиоактивности.

Началась война. Основные ядерные лаборатории прекратили работу. Значительная часть ученых была в армии, либо работала по военным заданиям. Однако урановая проблема не была забыта, и неоднократно ставился вопрос о важности незамедлительной работы над ней. В 1943 г. по решению правительства И. В. Курчатов организует в Москве специальный Институт для изучения возможности осуществления цепной ядерной реакции. Перед малочисленным коллективом нового Института стояла труднейшая задача. Нужно было «идейно» подготовить создание гигантских технических установок. Для этого следовало узнать все об уране и плутонии и замедляющих веществах. Все и быстро. И необходимо было сделать это в такое время, когда не было ни ускорителей, ни мощных источников нейтронов, когда испытывался большой недостаток в хороших детекторах излучения и электронных устройствах. Выход был один — скомпенсировать убогость технических средств точной постановкой опытов, сконцентрировать все усилия на главной задаче, а побочные направления откладывать. Это было время, когда разошлись пути чистой науки и технического приложения. И то и другое вместе было не под силу, следовало на время первое принести в жертву второму. Я вспоминаю, как при изучении резонансного поглощения нейтронов было обнаружено явление, совершенно не укладывавшееся в рамки статистической модели: аномально малое резонансное поглощение свинцом и оловом. Сейчас мы знаем, что так сказывается магичность этих

ядер. Тогда же мы вынуждены были отложить выяснение загадки до более спокойных времен и целиком сосредоточиться на изучении взаимодействия нейтронов с ураном.

«Урановая» проблема была решена в невиданно короткие сроки. Можно было вернуться к чисто научным задачам, но уже на более высоком уровне. Выросли новые кадры квалифицированных молодых ученых, технические возможности для экспериментирования стали несравненно богаче — появились реакторы, ускорители, совершенная измерительная аппаратура. Традиции Советской школы исследования радиоактивности, заложенные в Ленинградском физико-техническом институте, стали развиваться на новом уровне.

В 1950 г. П. Е. Спивак с сотрудниками провел виртуозные эксперименты по изучению β-распада нейтрона. Эти исследования имели ключевое значение для всей проблемы β-распада. Опыты Спивака дали наиболее точное значение постоянной слабого взаимодействия.

С. А. Баранов с сотрудниками довел до совершенства метод магнитного анализа α-частиц, предложенный в свое время Э. Резерфордом. Если Резерфорд использовал внешнее облучение α-частицами для получения первых сведений об ядре, то теперь прецизионное измерение энергии α-частиц, испускаемых в процессе распада, давало информацию о тонких деталях структуры ядра.

В Ленинграде вокруг Б. С. Джелепова собралась большая группа молодых физиков, которая провела много интересных исследований по β- и γ-спектроскопии. В Харькове, в Украинском физико-техническом институте, руководимом К. Д. Синельниковым, развернулись работы по многим направлениям физики ядра.

В наше время в ядерной физике господствует сложная техника и массовое производство результатов. Качественно новые данные появляются не столь уж часто. Но каждый раз мы убеждаемся, что продвижение вперед оказывается возможным либо благодаря значительному увеличению точности и чувствительности аппаратуры, либо за счет отказа от шаблона, изобретения нового подхода к проблеме. В этой связи хочется упомянуть работу В. М. Лобашова и сотрудников по исследованию несохранения четности в γ-распаде ядер. На мой взгляд,— это наиболее значительная работа по ядерной физике, сделанная в СССР за последние годы. В. М. Лобашов предложил оригинальный метод измерения циркулярной поляризации, обеспечивший повышение чувствительности в 100 раз. Одним из остроумных моментов метода является использование резонансной системы на базе эталонированного маятника. В умелых руках архаический маятник вступил в конкуренцию с современными приборами... и победил. Другая характерная особенность этой работы — тщательно продуманные и выполненные контрольные опыты. Основные измерения были проведены за несколько месяцев, а контрольные опыты заняли более двух лет.

В 1953 г. было начато новое для Советского Союза направление в исследовании радиоактивности — синтез и изучение свойств неизвестных

трансурановых элементов. К этому времени американские ученые во главе с Г. Сиборгом уже достигли замечательных результатов. Ими было синтезировано восемь элементов от нептуния ($Z=93$) до фермия ($Z=100$). Эти работы открыли новые возможности для исследования структуры ядра с помощью α-распада и спонтанного деления. Здесь нельзя не вспомнить совершенно удивительное по прозорливости замечание Э. Резерфорда, сделанное им в 1903 г.[1]:

«Если существуют элементы, более тяжелые, чем уран, то вполне вероятно, что они окажутся радиоактивными. Исключительная чувствительность методов химического анализа, основанных на радиоактивности, позволит опознать эти элементы, даже если они будут присутствовать в ничтожно малых количествах. Поэтому можно ожидать, что в будущем число известных радиоактивных элементов увеличится и что в незначительных количествах существует гораздо больше, чем три известных к настоящему времени радиоактивных элемента. Чисто химические методы исследования окажутся малопригодными на первом этапе изучения таких элементов. Основными факторами здесь являются постоянство излучений, их характеристики и существование или отсутствие эманаций или других продуктов распада». История подтвердила это предвидение. Изучение свойств радиоактивного распада занимает центральное место при идентификации новых элементов.

Синтез первых девяти заурановых элементов был осуществлен с помощью ядерных реакций, вызываемых нейтронами, ускоренными дейтонами и α-частицами. Однако дальнейшее продвижение вперед таким способом оказалось практически невозможным. Анализ показал, что для синтеза элементов тяжелее менделевия ($Z=101$) чрезвычайно перспективны ядерные реакции, вызываемые ускоренными многозарядными ионами — углеродом, азотом, кислородом, неоном и т. д. Необходимы были специальные ускорители многозарядных ионов. Развитие ядерной техники и достижения в области физики плазмы подготовили решение этой задачи. Уже в 1956 г. в Институте атомной энергии на имевшемся там полутораметровом циклотроне были получены пучки ионов углерода, азота, кислорода с очень хорошими для того времени параметрами. Вскоре мы пришли к выводу, что реализация огромных возможностей, даваемых тяжелыми ионами, не под силу небольшому коллективу, который этим занимался в Институте атомной энергии. Было предложено привлечь к участию в этих работах ученых социалистических стран, и эта тематика была перенесена в Дубну, в Объединенный институт ядерных исследований.

В 1960 г. в Дубне был введен в строй трехметровый ускоритель тяжелых ионов, обеспечивший широкий фронт исследований. Для работы на этом ускорителе была создана Лаборатория ядерных реакций, оснащенная современной аппаратурой. Новые экспериментальные возможности проявились уже на пути к неизвестным трансурановым элементам. Ра-

---

[1] Э. Резерфорд, Ф. Содди. Радиоактивное превращение, 1903.

ботая с ускоренными ионами кислорода и неона, ученые Дубны открыли две новые разновидности искусственной радиоактивности.

В 1961 г. Г. Н. Флеров, С. М. Поликанов и др. пытались синтезировать 104-й элемент в ядерной реакции $Pu^{242} + Ne^{22}$. Методика была нацелена на регистрацию спонтанного деления нового элемента. В соответствии с теорией ожидалось, что период полураспада должен быть около 0,01 *сек*. И действительно, такой спонтанно делящийся излучатель был обнаружен. Однако вскоре было показано, что это не изотоп элемента 104, а изомер Am^{242}, вероятность спонтанного деления которого примерно в 10^{23} больше, чем для основного состояния. Спонтанное деление с аномально коротким периодом как бы впитало в себя свойства двух явлений, открытых в Ленинграде перед войной,— изомерии искусственных изотопов и спонтанного деления. Сейчас это явление исследуется во многих лабораториях мира и дает богатую пищу для теоретических размышлений. По-видимому, здесь мы сталкиваемся с новым видом изомерии — изомерией формы.

В 1962 г. В. А. Карнаухову и др. впервые удалось зарегистрировать радиоактивный распад с испусканием протонов — эмиссию запаздывающих протонов. Новая разновидность искусственной радиоактивности была обнаружена в результате тонкого анализа свойств радиоактивных продуктов реакции, вызываемой ускоренными ядрами Ne^{20} в никелевой фольге. Сейчас известно, что эмиссия протонов — весьма распространенное свойство ядер, достаточно удаленных от линии β-стабильности. Уже открыто более 20 протонных излучателей. Это явление находит широкое применение для получения разнообразной информации о свойствах ядра. Следующим этапом в развитии этих работ является поиск протонного распада из основного состояния, а также поиск двупротонного распада, предсказанного В. И. Гольданским. Интересно отметить, что предположение о возможности эмиссии протона в радиоактивном распаде возникло в Лаборатории Э. Резерфорда. Такая гипотеза была высказана в 1915 г. Э. Марсденом. Изучая рассеяние α-частиц воздухом, он обнаружил длиннопробежные H-частицы (протоны), появление которых он не мог объяснить рассеянием ни на основных компонентах воздуха, ни на примесях водорода. Известно, что попытка Резерфорда проверить эту гипотезу привела к наблюдению первой ядерной реакции $N^{14}(\alpha, p)\,O^{17}$ — открытию, огромные последствия которого не нуждаются в комментариях.

Другой пример использования тяжелых ионов — синтез нейтроноизбыточных изотопов легких элементов в реакциях передачи нуклонов. Недавно В. В. Волков и др. получили 11 новых изотопов, среди которых C^{18}, N^{21}, O^{24}, F^{25}, Ne^{26}. По существующим сейчас теоретическим представлениям исследование свойств пересыщенных нейтронами ядер может пролить новый свет на вопрос о нуклон-нуклонном взаимодействии.

Но вернемся к проблеме новых трансурановых элементов. Это направление в последние годы привлекает все большее и большее внимание ученых. Мы с удовлетворением может отметить, что вклад Дубны здесь весьма значителен. В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института

ядерных исследований впервые получены наиболее достоверные данные об элементах с порядковыми номерами 102 и 103.

В 1964 г. Г. Н. Флеровым с сотрудниками был открыт спонтанно делящийся изотоп 104 элемента, названного курчатовием. Эта работа потребовала от экспериментаторов изощренности и буквально самоотверженности, чтобы в условиях крайне малой вероятности образования элемента (примерно один атом в час) и фона от спонтанно делящихся изомеров получить надежные доказательства. Они были получены при изучении тонких закономерностей образования нового элемента в ядерной реакции. Для установления факта синтеза нового элемента важнейшее значение имеет его химическая идентификация. Исследование химических свойств 104 элемента представляет большую ценность еще и потому, что обещает прояснить структуру периодической системы для тяжелых элементов.

Чехословацкий ученый И. Звара с сотрудниками в Дубне разработал остроумную методику, позволившую провести экспрессную газовую химию (поскольку время жизни изотопа исчисляется десятыми долями секунды) на считанном числе атомов нового элемента. Было показано, что курчатовий уже не является членом серии актинидов, а имеет свойства, отвечающие IV группе элементов.

В начале 1970 г. в Дубне был открыт следующий трансурановый элемент — 105. Изотоп этого элемента с массовым числом 261 был синтезирован в результате ядерной реакции Am^{243} (Ne^{22}, $4n$). И снова — эксперимент в условиях чрезвычайно низкого выхода реакции: получение физических и химических доказательств образования нового элемента. Изотоп 105^{261} был зарегистрирован как по спонтанному делению, так и по α-распаду. Ученые Дубны предложили назвать элемент 105 в честь Нильса Бора, который по праву считал себя учеником Резерфорда и даже называл его своим «вторым отцом».

Исследования α-распада и спонтанного деления изотопов трансурановых элементов дают весьма важную информацию об этих типах радиоактивности и влиянии структуры ядра на свойства распада.

В настоящее время начался новый этап в истории трансуранов — синтез и поиск сверхтяжелых элементов. До недавнего времени считалось, что времена жизни изотопов и вероятности их образования должны катастрофически падать с увеличением порядкового номера, что приведет к фактическому завершению задачи синтеза где-то на элементах с номером 106—108. Это следовало из простой экстраполяции свойств известных ядер. Только Д. Уиллер имел смелость еще в 1955 г. предсказать на основе капельной модели ядра существование гигантских ядер с A, равным до 600, и Z, равным до 160. Но эти оценки были столь грубы, что к ним относились с большой осторожностью. Но в последние годы в результате мощных теоретических работ (В. Святецкий — США, В. Струтинский — СССР, С. Нильсон — Швеция и др.) появилась надежда, если не уверенность, что за короткоживущими элементами имеется остров относительной стабильности в районе $Z=110-Z=126$ и $N=184$. Появление дополнительной

устойчивости связано с влиянием ядерных оболочек, отвечающих числу протонов $Z=114$ и 126 и числу нейтронов $N=184$. Некоторые теоретики уже обсуждают следующее магическое число протонов $Z=164$. Мне думается, невозможно переоценить важность информации, которая будет получена в результате открытия и исследования сверхтяжелых элементов. Поэтому понятен энтузиазм ученых разных стран, которые ищут и испытывают различные пути в решении проблемы.

Сейчас уже имеются указания о существовании в природе сверхтяжелых элементов. Внук Резерфорда, английский ученый П. Фаулер в 1967 г. исследовал элементный состав космических лучей с помощью ядерных фотоэмульсий. И обнаружил следы, которые могли быть оставлены ядрами с зарядом $Z=103 - Z=110$.

Еще на заре исследования радиоактивности Джоли открыл так называемые плеохроические гало в слюде, они привлекали внимание и Э. Резерфорда. Некоторые загадочные типы гало могут быть объяснены сейчас α-распадом «вымерших» сверхтяжелых изотопов.

Несомненно, что нужен широкий и планомерный поиск сверхтрансуранов в природе с использованием промышленных установок для обработки большого количества «подозрительных» природных материалов, а также с применением приборов, обладающих высокой чувствительностью для обнаружения микропримесей сверхтяжелых элементов.

Поиск «естественных» сверхтяжелых элементов проводится сейчас учеными Дубны и многих зарубежных центров.

Другой подход к проблеме — синтез сверхтяжелых ядер на ускорителях. Это весьма нелегкая задача. Прежде всего она требует получения ускоренных пучков более тяжелых ионов, чем имеющиеся в настоящее время, таких, как ксенон, уран. Наиболее перспективной реакцией синтеза представляется процесс, который мы называем *квазиделением*, при взаимодействии быстрых ядер урана с ураном. Помимо этого нужны и новые способы идентификации сверхтяжелых ядер, которые будут появляться на интенсивном фоне продуктов побочных каналов реакции.

Проблема сверхтяжелых ядер бросает вызов экспериментальной ядерной физике, подобно тому, как это было перед войной, после открытия деления урана нейтронами. Вызов принят. Можно надеяться, что в наступающем десятилетии в учении о радиоактивности и структуре ядра откроется новая страница в связи с успешным разрешением этой проблемы.

История ядерной физики началась с исследования радиоактивности. Это направление, фундамент которого был заложен Эрнестом Резерфордом, и по сей день продолжает оставаться предметом интереса физики. Мы с удовлетворением отмечаем, что оно не исчерпало себя, и можно надеяться, что в ближайшие годы исследование радиоактивности принесет важную информацию о структуре ядра. Нет сомнения, что подлинный успех будет там, где изощренная техника современной лаборатории соединится с логикой и вдохновением классической ядерной физики, характерными для школы Резерфорда.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5

1894 г.

1. Намагничивание железа высокочастотными разрядами 7

1897 г.

2. Магнитный детектор электрических волн и некоторые его применения 41

1899 г.

3. Излучение урана и вызываемая им электропроводность 66

1900 г.

4. Радиоактивное вещество, испускаемое соединениями тория 110

5. Радиоактивность, образующаяся в веществах под действием соединений тория 121

1901 г.

6. Энергия рентгеновских и беккерелевых лучей и энергия, необходимая для образования иона в газах 148

7. Новый газ из радия 182

1902 г.

8. Отклоняемые лучи радиоактивных веществ 187

9. Причина и природа радиоактивности. Часть I 202

10. Причина и природа радиоактивности. Часть II 225

11. Возбужденная радиоактивность и ионизация атмосферы 240

1903 г.

12. Возбужденная радиоактивность и способ ее переноса 258
13. Отклонение легко поглощаемых лучей радия в магнитном и электрическом полях 279
14. Сравнительное изучение радиоактивности радия и тория 288
15. Радиоактивное превращение 300

1904 г.

16. Тепловой эффект эманации радия 314
17. Последовательность превращений радиоактивных тел 328
18. Излучение и эманация радия. Часть I 378
19. Излучение и эманация радия. Часть II 387
20. Медленные превращения продуктов радия 395

1905 г.

21. Радий—причина земного тепла 409

Г. Н. Флеров. Развитие учения о радиоактивности в Советском Союзе 419

Эрнест Резерфорд
Избранные научные труды. **Радиоактивность**

Утверждено к печати
редакционной коллегией серии «Классики науки»

Редактор *Л. В. Гессен*
Художественный редактор *Н. Н. Власик*
Технический редактор *Р. Г. Грузинова*

Сдано в набор 10/V-1971 г.
Подписано к печати 19/VII 1971 г.
Формат 70×90$^1/_{16}$. Бумага № 1. Усл. печ. л. 31,9.
Уч.-изд. л. 27,2. Тираж 4000. Тип. зак. 2275.
Цена 2 р. 31 к.

Издательство «Наука»
Москва К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография Издательства «Наука»
Москва Г-99, Шубинский пер., 10

ОПЕЧАТКИ И ИСПРАВЛЕНИЯ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
55	17 св.	рис. 6	рис. 7
56	17 сн.	рис. 7	рис. 6
390	8 св.	стабильно	нестабильно
406	5 сн.	β-лучи	α-лучи

Эрнест Резерфорд



Rutherford


E Rutherford

ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ





2 р 31 к

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»